www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

PHILIPS TECHNISCH TIJDSCHRIFT

JAARGANG 32, 1971, no. 2

Het meetnet voor SO_2-concentraties in het Rijnmondgebied

H. J. Brouwer, S. M. de Veer en H. Zeedijk

Allerwegen werkt men in de geïndustrialiseerde landen aan projecten om de milieuverontreiniging „in kaart te brengen". In onderstaand artikel wordt een door Philips ontworpen meetnet beschreven voor de meting van de luchtverontreiniging in het Rijnmondgebied.

Inleiding

Sinds het begin van zijn ontstaan heeft de mens afvalstoffen geproduceerd en in de atmosfeer geloosd. Met het voortschrijden van de technische ontwikkeling is de hoeveelheid hiervan snel toegenomen. Het grote publiek kent zo langzamerhand vele van deze afvalprodukten bij name: kooldioxide, koolmonoxide, stikstofoxiden, zwaveldioxide, ozon, onverbrande koolwaterstoffen, stof, enz. Anders dan men vaak denkt, is de produktie van de meeste van deze stoffen door de mens een orde van grootte kleiner dan de natuurlijke produktie. Dat we toch nu reeds zoveel aandacht moeten geven aan de kunstmatige produktie door de mens, komt vooral doordat deze produktie veelal in geografisch beperkte gebieden plaatsvindt. Vooral als de weersomstandigheden ongunstig zijn, kunnen plaatselijk grote concentraties ontstaan. Stank, irritatie van de ogen, irritatie van de ademhalingswegen, hoofdpijn en schade aan gewassen zijn veel gehoorde klachten. Zelfs kan er sprake zijn van een grotere sterftekans, speciaal bij mensen die een verhoogde gevoeligheid voor luchtverontreiniging hebben doordat zij lijden aan ziekten van de ademhalingsorganen.

In de meeste geïndustrialiseerde landen is de luchtverontreiniging een punt van bijzondere zorg van de overheid geworden. De Nederlandse overheid heeft aan Philips de opdracht verstrekt een volautomatisch meetnet te ontwikkelen dat de concentratie van zwaveldioxide meet in Nederland. Een eerste regionaal meetnet, in het Rijnmondgebied, is inmiddels voltooid en in oktober 1969 in gebruik genomen [1]. Dit meetnet wordt hier besproken. Soortgelijke meetnetten zijn nadien ook reeds in andere industriecentra gereed gekomen, met name in Twente en in Zeeuws-Vlaanderen. In de toekomst zullen deze verschillende regionale meetnetten gekoppeld worden aan een meetnet met grotere „maaswijdte" dat geheel Nederland zal bestrijken. Er wordt nog onderhandeld over plannen om dit toekomstige Nederlandse netwerk ook uit te breiden tot België en een deel van West-Duitsland. Er worden tevens reeds voorbereidingen getroffen om het besproken meetnet ook geschikt te maken voor het meten van andere luchtverontreinigingen, zoals ozon en stikstofoxiden.

In hoeverre heeft het zin om slechts enkele van de vele verontreinigende stoffen te meten en waarom is nu juist de stof SO_2 als eerste gekozen? De weersomstandigheden die kunnen meewerken aan het ontstaan van grote concentraties, hebben in beginsel dezelfde invloed op alle luchtverontreinigingen. Het stijgen van de concentratie van één verbinding houdt dus de waarschuwing in dat ook de andere verbindingen in grotere concentraties kunnen gaan voorkomen. Bovendien heeft de praktijk geleerd dat de luchtverontreinigingen die het produkt zijn van één zelfde soort bronnen — b.v. het koolmonoxide, de stikstofoxiden en de koolwaterstoffen afkomstig van het autoverkeer — in

Drs. H. J. Brouwer en ir. S. M. de Veer, medewerkers van Philips' Hoofdindustriegroep PIT (Produkten voor Industriële Toepassing), Eindhoven; ir. H. Zeedijk, medewerker van de Technische Hogeschool te Eindhoven.

[1] Aan de totstandkoming van de detector is meegewerkt door het Rijksinstituut voor de Volksgezondheid. Wij willen ook de bijdrage vermelden van prof. ir. J. G. Hoogland van de Technische Hogeschool te Eindhoven en van G. W. Meijerman van het Rijksinstituut voor de Volksgezondheid, met wie wij vele waardevolle discussies hebben gehad.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

tamelijk constante verhoudingen voorkomen. Bij een gegeven verzameling bronnen geeft de concentratie van één verbinding dus informatie over die der andere. De stof SO_2 is een van de meest representatieve van de luchtverontreinigingen, in deze zin dat het bijna overal in de stedelijke en geïndustrialiseerde gebieden in relatief grote hoeveelheden wordt geproduceerd en geloosd. Bovendien wordt de stof door de natuur nauwelijks geproduceerd. Een hoge SO_2-concentratie is dus een duidelijk waarschuwingssein. De stof SO_2 wordt in dit verband wel als „tracer" of als „indicator" aangeduid.

De meteorologische condities hebben, zoals gezegd, een grote invloed op de veranderingen in de concentraties van luchtverontreinigingen. In het bijzonder noemen we de invloed van het verticale temperatuurverloop in de atmosfeer. Normaal neemt de temperatuur met toenemende hoogte af. Indien nu, door oorzaken waarover we aanstonds zullen spreken, het temperatuurverval beneden een bepaalde waarde komt of, sterker nog, als de temperatuur met toenemende hoogte toeneemt (zg. temperatuurinversie), wordt de lucht in de onderste lagen zwaarder dan in de hogere. Dan hopen de luchtverontreinigingen zich in de onderste lagen op doordat er in de atmosfeer geen beweging in verticale richting plaatsvindt.

Temperatuurinversie ontstaat dikwijls tijdens een onbewolkte nacht ten gevolge van afkoeling door uitstraling van het aardoppervlak. In het algemeen wordt de inversielaag in de loop van de dag door de zon en de wind weer afgebroken. Het kan echter voorkomen, bij voorbeeld bij windstil weer, dat zich tussen 100 en 300 m gedurende enkele dagen een inversielaag handhaaft. Dit zijn de dagen dat men bijzonder bedacht moet zijn op het toenemen van de luchtverontreiniging.

Met het in Rijnmond geïnstalleerde meetnet worden veranderingen in de concentratie van SO_2 voortdurend en terstond geregistreerd, en worden de verkregen meetgegevens door een computer verwerkt. Dank zij deze snelle registratie en verwerking is het mogelijk reeds in een vroeg stadium de weercondities waar te nemen die de luchtvervuiling bevorderen [2], zodat de industrie tijdig gevraagd kan worden om preventieve maatregelen te nemen. Deze tijdige alarmering is een bijzonder kenmerk van dit systeem, dat elders in de wereld vooralsnog ontbreekt.

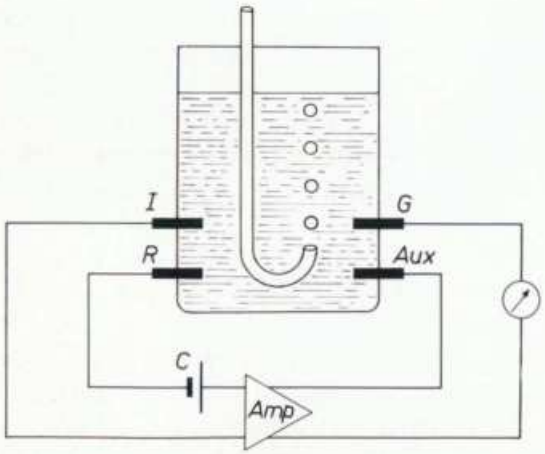


Fig. 1. Het principe van de meting van SO_2 volgens de zg. coulometrische methode. *I* indicatorelektrode van platina. *R* referentie-elektrode van Ag-AgBr. *G* generatorelektrode. *Aux* hulpelektrode. *C* spanningsbron. *Amp* versterker. De te onderzoeken lucht wordt door een meetcel geleid die gevuld is met 0,1 M kaliumbromide, 2 M zwavelzuur en een kleine hoeveelheid vrij broom. Het SO_2 in de lucht reduceert het vrije broom. De hierdoor veroorzaakte vermindering van het broomgehalte verandert het potentiaalverschil tussen *I* en *R*, en dit induceert weer een stroom tussen *G* en *Aux* die zoveel broom genereert dat de broomconsumptie gecompenseerd wordt. De stroom tussen *G* en *Aux* is een maat voor de per tijdseenheid aangevoerde hoeveelheid SO_2.

Het principe van de meting

De SO_2-concentratie wordt gemeten volgens het principe van de zg. continue coulometrische titratie [3]. In de door ons ontwikkelde detector wordt de lucht door een meetcel geleid, gevuld met een oplossing van 0,1 M kaliumbromide in 2 M zwavelzuur, dat tevens een kleine hoeveelheid vrij broom bevat (*fig. 1*). Het SO_2 in deze lucht vermindert de hoeveelheid broom door reductie van het vrije broom tot broomionen. Met behulp van een regelkring, bestaande uit twee elektrodeparen, een spanningsbron en een versterker, wordt de hoeveelheid broom constant gehouden. Het eerste elektrodepaar *I* en *R* „meet" de broomconcentratie als (redox)potentiaalverschil en bij de gewenste waarde van de broomconcentratie wordt deze spanning zodanig door de spanningsbron *C* gecompenseerd dat het uitgangssignaal van de versterker *Amp* nul is. Vermindert de broomconcentratie door reactie met SO_2, dan verandert het ingangssignaal van de versterker, hetgeen leidt tot het vloeien van een stroom tussen het tweede elektrodepaar *G* en *Aux*. Door elektrolyse wordt er dan broom gevormd, totdat de concentratie ervan zijn aanvankelijke waarde terugheeft. De stroom waardoor het broom wordt gevormd, wordt geregistreerd als maat voor de SO_2-concentratie van de lucht.

Een belangrijk kenmerk van dit meetprincipe is nog dat er geen reagentia verbruikt worden. Dit is van belang omdat de detector langdurig zonder toezicht moet kunnen functioneren (ten minste drie maanden), en dit heeft mede de gehele conceptie van het meetsysteem bepaald.

[2] L. A. Clarenburg, A telemetered system to predict unfavourable weather conditions, lezing (no. 68-55) gehouden op het 61e jaarlijkse congres van de Air Pollution Control Association, St. Paul (V.S.), 1968.

[3] P. A. Shaffer Jr., A. Briglio Jr., en J. A. Brockman Jr., Anal. Chem. **20**, 1008, 1948; H. Landsberg en E. E. Escher, Industr. Engng. Chem. **46**, 1422, 1954.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Fig. 2. Een SO_2-detector met „snuffelpaal" te Schiedam.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

De detector

De SO_2-detector bestaat van buiten gezien uit een drie meter hoge „snuffelpaal", door welke de lucht wordt aangezogen, en een straatkast (*fig. 2*). In deze kast bevinden zich twee uitneembare compartimenten, een voor de chemische apparatuur, waaronder de meetcel, en een ander voor de elektronische apparatuur (*fig. 3*). De complete detector is schematisch voorgesteld in *fig. 4*.

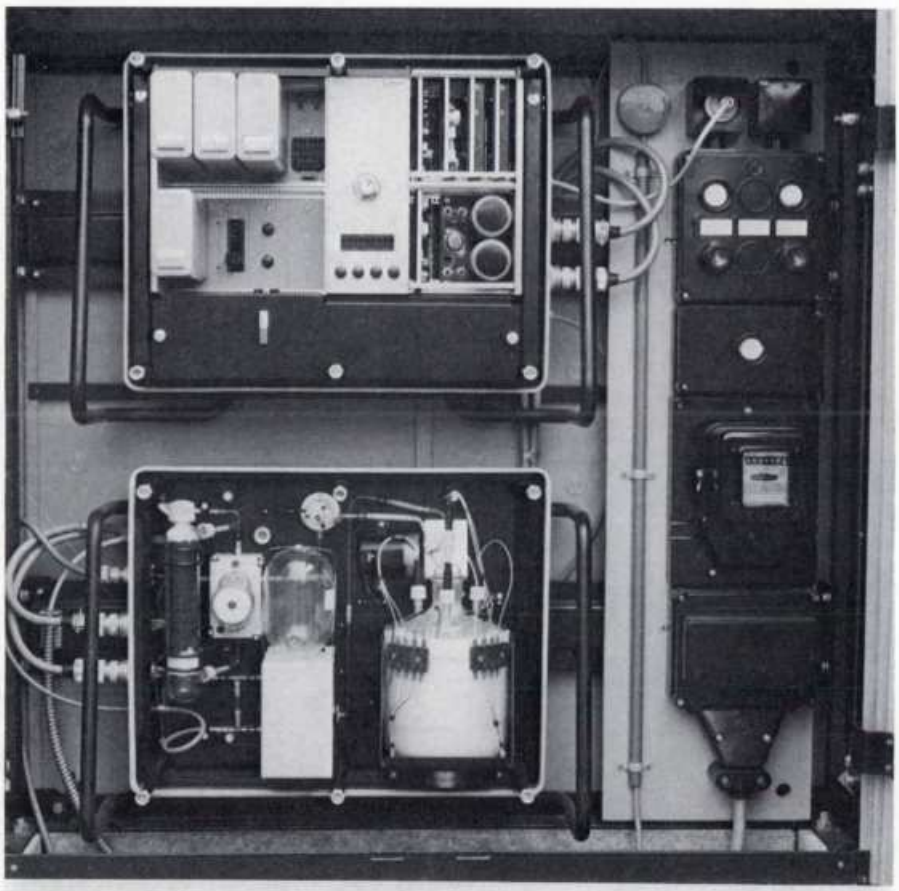


Fig. 3. Binnenaanzicht van de SO_2-detector. Beneden het chemische, boven het elektronische compartiment.

De kop van de snuffelpaal is voorzien van een stoffilter *1*, dat elektrisch verwarmd wordt tot een temperatuur die, afhankelijk van de buitentemperatuur, fluctueert van ongeveer 100 tot 120 °C. Bij deze hoge temperatuur kan zwaveldioxide niet geadsorbeerd worden aan de gevangen stofdeeltjes en insekten, en is het filter bij mist gevrijwaard van vochtdruppels, die eveneens SO_2 zouden kunnen opnemen. Er vindt bij deze temperatuur nog geen oxidatie van SO_2 of ontleding van stofdeeltjes plaats. Eveneens ter voorkoming van adsorptie van SO_2 zijn de aluminium delen van de inlaat bedekt met een laagje „Nylon" en wordt een buis van „Teflon" gebruikt voor het transport van de lucht naar de meetcel. De pomp *2* zuigt de lucht aan, waarbij het capillair *3* ervoor zorgt dat de luchtstroom een constante waarde heeft van ongeveer 150 cm^3 per minuut. In de buis die de lucht naar de meetcel voert, bevindt zich een driewegkraan *4*, eveneens van „Teflon", die met behulp van een motor *5* van stand veranderd kan worden. In één stand meet het apparaat; voorts kan de kraan gesteld worden in de nulstand en ten slotte in een stand waarbij het apparaat geijkt wordt. In de meetstand (*a*) wordt de lucht direct naar de meetcel geleid via een filter *6*, bestaande uit een rol zilvergaas die tot ongeveer 120 °C verhit wordt. Dit filter werkt ontledend op of reageert met bestanddelen die storend kunnen werken bij de SO_2-meting, zoals ozon en H_2S. In de nul- en de ijkstand passeert de lucht een filter *7* van geactiveerde kool, waarin alle SO_2 geadsorbeerd wordt. In de ijkstand (*b*) wordt bovendien uit een SO_2-bron *8* een constante stroom SO_2-gas toegevoerd. Deze stroom wordt tijdens de onderhoudsbeurten vergeleken met die van een andere SO_2-bron, die op zijn beurt weer geijkt is door een fotometrische bepaling met pararosaniline [4]. Door de kraan de verschillende standen te laten aannemen, hetgeen in Rijnmond tweemaal daags vanaf een centrale meld- en regelkamer gebeurt, kan het meetsignaal vergeleken worden met het nulsignaal en het ijksignaal. In *fig. 5* wordt een

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

registrogram getoond dat men op deze wijze verkrijgt.

De meetcel *9* bestaat uit een binnen- en een buitenvat (niet in het schema weergegeven), die elk twee elektrodes bevatten (*fig. 6*). De lucht wordt naar het binnenvat geleid, en hier spelen zich de belangrijkste reacties af. Ten eerste: het in de lucht aanwezige SO_2 wordt geoxideerd door het vrije broom. Ten tweede: aan de platina-elektrode *I* wordt een redoxspanning opgewekt die afhangt van de broomconcentratie. De bijbehorende Ag-AgBr-elektrode *R* bevindt zich in het buitenvat. Deze heeft ten opzichte van de vloeistof een nagenoeg constante potentiaal dank zij het feit dat de Br^--ionen die de potentiaal van deze elektrode bepalen, in grote overmaat aanwezig zijn. De derde belangrijke reactie in het binnenvat is het vrijkomen van broom aan de elektrode *G* bij het vloeien van een elektrolysestroom. De bijbehorende elektrode *Aux* bevindt zich weer in het buitenvat.

Het binnenvat van de meetcel is vrij klein gemaakt, omdat de tijdconstante van de regelkring die het broomgehalte constant houdt, bepaald wordt door het volume van de vloeistof in dit vat. Binnen- en buitenvat zijn door een kleine opening met elkaar verbonden. De vloeistof in het buitenvat werkt verdunnend op eventuele verontreinigingen die in het binnenvat ontstaan of binnenkomen.

Het is hoogst belangrijk dat de temperatuur van de meetcel constant is. De temperatuur beïnvloedt de gemeten potentiaalverschillen, de verdamping en andere parameters. In het beschreven apparaat is een temperatuur gekozen die onder normale omstandigheden hoger ligt dan de buitentemperatuur, nl. 37 °C. Er behoeft dus niet gekoeld te worden, hetgeen tamelijk moeilijke en kostbare voorzieningen gevergd zou hebben. Bij de gekozen temperatuur is de verdamping van broom en van water nog niet storend. De verdamping van broom wordt automatisch gecompeneerd door de regelschakeling. Ook als de lucht geen SO_2 bevat, vloeit er dus een zwakke stroom tussen *G* en *Aux*, de zg. nulstroom. De SO_2-concentratie wordt gemeten als een verhoging boven deze nulstroom. Ter compensatie van de verdamping van water wordt gebruik gemaakt van een Peltier-koelelement *10*, dat geplaatst is in de uit de meetcel stromende lucht. Als de vloeistofspiegel in het buitenvat beneden een zeker niveau komt, wordt het koel-

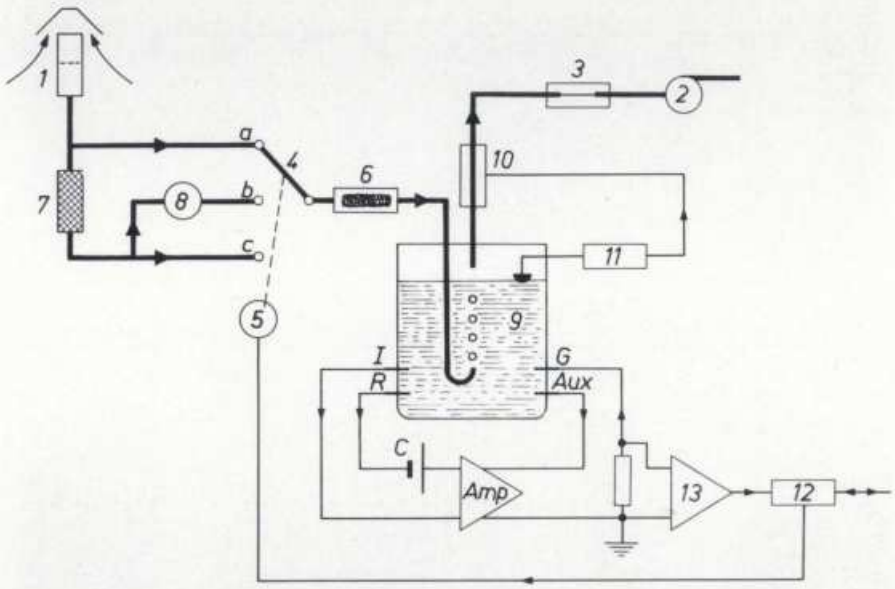


Fig. 4. Schema van SO_2-detector (vgl. fig. 2). De pomp *2* zuigt lucht aan, waarbij het capillair *3* ervoor zorgt dat de luchtstroom een constante waarde heeft. De lucht wordt gezuiverd van stof, insekten e.d. door het filter *1*, en van vele gasvormige luchtverontreinigingen (behalve SO_2) door het filter *6*. De SO_2 uit de lucht induceert bij aankomst in de meetcel *9* een elektrisch signaal, dat geschikt gemaakt wordt voor transmissie per telefoonlijn door de eindversterker *13* en de telemetrie-apparatuur *12*. De signalen van de detector worden ontvangen in de centrale meld- en regelkamer, waarin een computer staat opgesteld. De computer zendt via dezelfde telefoonverbinding regelsignalen uit naar de motor *5*, waarmee de driewegkraan *4* in verschillende standen kan worden gezet. Getekend is de kraan in de zg. meetstand (*a*). In de zg. ijk- en nulstand van de kraan passeert de lucht het filter *7*, bestaande uit geactiveerde kool, waarin alle SO_2 wordt geadsorbeerd. In de ijkstand (*b*) voegt de SO_2-bron *8* aan de aldus van alle SO_2 ontdane lucht een bekende hoeveelheid SO_2 toe. Door het meetsignaal te vergelijken met het ijk- en het nulsignaal berekent de computer de SO_2-concentratie van de aangevoerde lucht. *10* Peltier-koelelement. *11* Schakeling die dit element inschakelt wanneer het vloeistofniveau in *9* te laag wordt.

[4] F. P. Scaringelli, B. E. Saltzman en S. A. Frey, Anal. Chem. **39**, 1709, 1967.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

element ingeschakeld. Dientengevolge condenseert er water in de leiding daar ter plaatse en dit druppelt terug in de meetcel.

We dienen nog even enige aandacht te geven aan de reeds vermelde SO_2-ijkbron *8*. Deze bestaat uit een glazen bol, gevuld met SO_2 en lucht van atmosferische druk. De bron mondt uit in een kleine capillaire buis die gevuld is met siliconenrubber. Deze stof is permeabel voor SO_2, en uit de opening stroomt dan ook continu SO_2 naar buiten. De diameter en de lengte van de capillaire buis zijn aangepast aan de gewenste geringe uitstromingssnelheid. Deze is in geringe mate afhankelijk van de temperatuur. De bron dient derhalve op constante temperatuur gehouden te worden. Elke drie maanden moet de bron herijkt worden, omdat na deze periode de uitstromingssnelheid een neiging vertoont om af te nemen. Daar het continu uitstromende SO_2 een ongewenste opeenhoping van verontreiniging in het apparaat zou kunnen veroorzaken als de driewegkraan in de nul- of in de meetstand staat, wordt in deze standen langs de bron een extra luchtstroom gestuurd om het overtollige SO_2 af te voeren (niet in het schema weergegeven).

In de houder van de elektronische apparatuur bevinden zich de schakelingen *11* voor het in- en uitschakelen van het Peltier-koelelement, en die van de thermostaten; voorts de andere elektronische schakelingen, de voedingstransformator, de pomp en de telemetrie-apparatuur *12*.

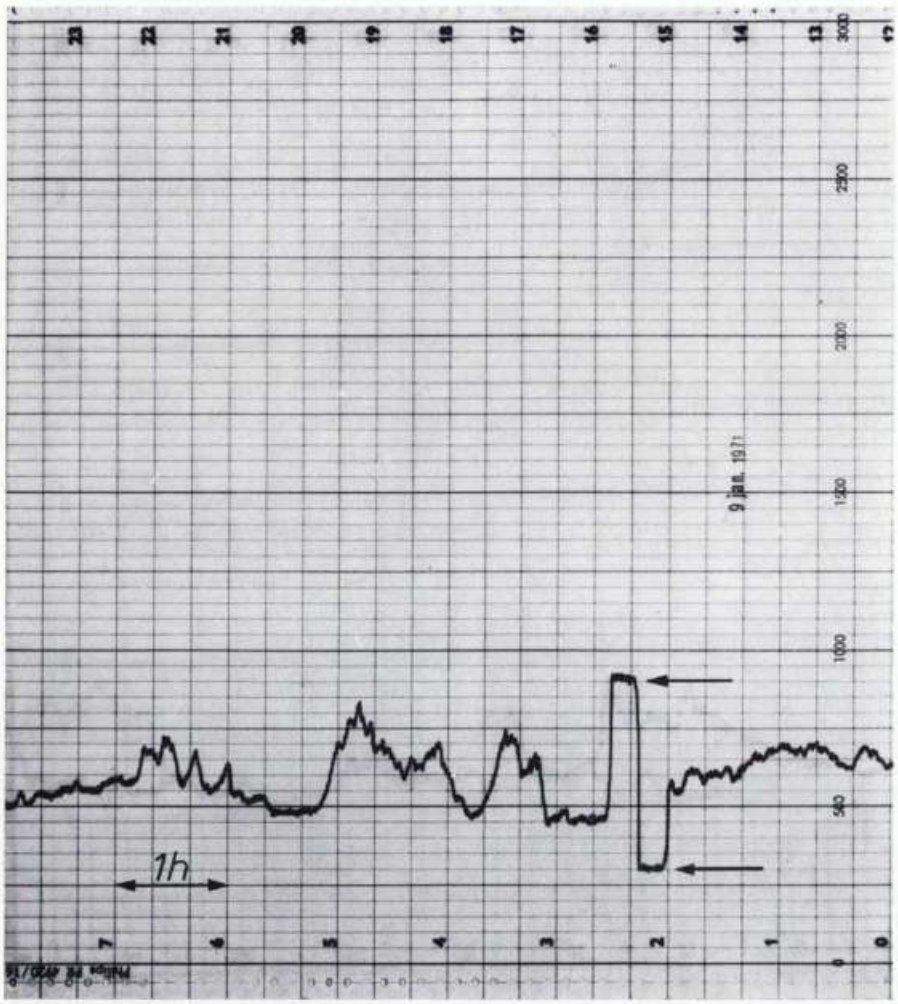


Fig. 5. Registrogram dat het verloop van de SO_2-concentratie weergeeft op 9 januari 1971. De tijdschaal loopt van rechts naar links. De ijk- en nulniveaus zijn met pijlen aangegeven. Het ijkniveau correspondeert met een SO_2-concentratie van 0,56 mg/m³.

In de telemetrie-eenheid, een Philips Multi-Tone Telesupervision System, wordt een signaal gegenereerd waarin de grootte van de uitgangsstroom van de eindversterker *13* is gecodeerd in de vorm van een frequentie [5]. Dit signaal is geschikt voor transmissie per telefoonlijn; het neemt slechts een klein deel van de bandbreedte van de telefoonlijn in beslag. De telemetrie-eenheid bevat bovendien twee ontvangers, die via dezelfde telefoonverbinding worden gevoed met regelsignalen vanuit de centrale meld- en regelkamer. Die ontvangers bepalen de stand van de driewegkraan *4*.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Het gebruik van *twee* ontvangers, die over twee verschillende kanalen worden gevoed, waarborgt dat het systeem minder gevoelig is voor eventuele storingen op de telefoonlijn.

Alvorens een beschrijving te geven van het meetnet in Rijnmond bespreken we thans het voorbereidend onderzoek aan de detectors en de beproeving ervan, die gedeeltelijk in het laboratorium en gedeeltelijk in het Rijnmondgebied plaatsvond.

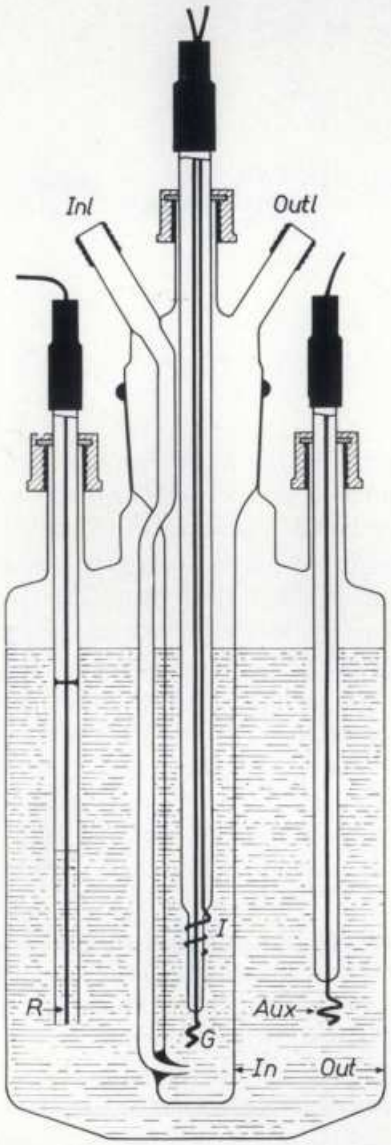


Fig. 6. De meetcel. In het binnenvat *In* bevinden zich de indicatorelektrode *I* en de generatorelektrode *G*, in het buitenvat *Out* de referentie-elektrode *R* en de hulpelektrode *Aux*. *Inl* instroomopening van de te onderzoeken lucht. *Outl* uitstroomopening.

Onderzoek, beproeving en eerste praktijkervaring

Bij het onderzoek aan de meetcellen is in de eerste plaats nagegaan in hoeverre zij ook reageren op andere luchtverontreinigingen dan SO_2. Het storend effect adarvan wordt uitgedrukt door het quotiënt I_X van het meetsignaal van 0,5 p.p.m. van de stof X en dat van 0,5 p.p.m. SO_2. Het onderzoek van het storend effect van een stof gebeurde door een bekende hoeveelheid van die stof toe te voegen aan een stroom lucht die ook een bekende hoeveelheid SO_2 bevatte. De afneming (in geval van een oxiderende stof) of de toeneming (bij een reducerende stof) van het SO_2-signaal bepaalt de grootte van I_X. De resultaten, evenals de toegepaste wijze van dosering en ijking, zijn gegeven in *tabel I*. Het storend effect van de meeste luchtverontreinigingen, zoals stikstofdioxide, stikstofmonoxide, ozon, zwavelwaterstof, ethyleen, benzeen en aldehyden, is gering. Alleen methylmerceptaan stoort aanzienlijk, maar in de praktijk is dat niet van belang, omdat deze verbinding doorgaans slechts in heel lage concentraties voorkomt. De andere onderzochte stoffen hebben alleen een storend effect op de SO_2-meting als hun concentratie vele malen groter is dan de SO_2-concentratie, hetgeen in de praktijk zelden zal voorkomen.

Wij hebben nu reeds ruim vier jaar ervaring opgedaan met de SO_2-detectors, waarvan twee jaar in het Rijnmondgebied. De ervaring was gunstig. De instrumenten voldeden aan de eisen van een constante nulstroom en van een goede reproduceerbaarheid van het ijksignaal. De nauwkeurigheid van de detectors werd gecontroleerd door de gemiddelde dagelijkse waarden van de SO_2-concentratie ook te bepalen volgens de pararosaniline-methode[4]. De verschillen van de gevonden waarden waren nooit groter dan 8 %. De meetcellen hebben gedurende de gehele onderzoekingsperiode nooit enig teken van vervuiling vertoond. Na drie maanden was ook het stoffilter in de kop van de snuffelpaal nog heel goed bruikbaar, ondanks het feit dat er zich een aanzienlijke hoeveelheid stof in had verzameld. Na een dergelijke tijdsperiode ondervond de luchtstroom nauwelijks een grotere weerstand en ook bleek

Tabel I. Het quotiënt van I_X het meetsignaal van 0,5 p.p.m. van de stof X en dat van 0,5 p.p.m. SO_2. Tevens is de wijze van dosering en van ijking aangegeven. (Bij de laatste vier is gedoseerd met een gekalibreerde injectiespuit, waardoor ijking overbodig is. Voor de wijze van doseren en ijken bij ethyleen, zie de aangehaalde literatuur.)

Verontreiniging X	I_X	dosering	ijking
Stikstofdioxide	0,05	permeatiebron	fotometrisch
Stikstofoxide	0,00	,,	,,
Ozon	0,00	UV-bestraling	met SO_2-detector
Ethyleen [6]	0,02	—	—
Zwavelwaterstof	0,00	permeatiebron	met SO_2-detector
Methylmercaptaan	1,8	,,	fotometrisch [7]
Benzeen	0,00	injectiespuit	—
Chloroform	0,00	,,	—
Zwavelkoolstof	0,00	,,	—
Propionaldehyde	0,01	,,	—

[5] J. J. Wilting, Ingenieur **82**, G 75, 1970 (no. 27).
[6] H. W. Washburn en R. R. Austin, Proc. Nat. Air Pollution Symp. **1** (1949), 69, 1951.
[7] H. Moore, H. L. Helwig en R. J. Graul, Amer. Industr. Hyg. Assoc. J. **21**, 446, 1960.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Fig. 7. De verdeling van de 31 SO_2-detectors over het Rijnmondgebied. *CMR* is de centrale meld- en regelkamer.

uit analyses dat er nagenoeg geen SO_2 in het stof was geadsorbeerd. Eén van de conclusies waartoe we kwamen, was dat een eenvoudige onderhoudsbeurt eens in de drie maanden inderdaad voldoende is om betrouwbare metingen van de SO_2-concentratie in de atmosfeer te waarborgen.

De detector die thans in gebruik is, heeft de volgende eigenschappen. Hij kan ingesteld worden op verschillende gevoeligheden, waarbij de twee uiterste standen resp. een meettraject geven van nul tot 0,1 p.p.m. (0,3 mg SO_2/m^3) en van nul tot 3 p.p.m. (10 mg SO_2/m^3). De responsietijd voor een stapsgewijze verandering van de SO_2-concentratie is ongeveer 1½ minuut; na deze tijd wijst de detector 63 % van de eindwaarde aan. De nulpuntsverschuiving bedraagt minder dan 0,01 p.p.m. per dag (niet cumulatief), en de reproduceerbaarheid van de ijking is beter dan 0,01 p.p.m. Door de ingebouwde ijkmogelijkheid kan het apparaat op eenvoudige wijze dagelijks worden geijkt en hangt de nauwkeurigheid voornamelijk af van de nauwkeurigheid van de ijking van de SO_2-bron door middel van de pararosanilinemethode.

Het meetnet in Rijnmond

Het meetnet in Rijnmond bestaat uit 31 detectors. Dit aantal is genomen op grond van een statistisch onderzoek, uitgevoerd door dr. L. A. Clarenburg van het Openbaar Lichaam Rijnmond [8]. De detectors zijn over het gebied verdeeld zoals in *fig. 7* is weergegeven en staan in verbinding met een computer Philips P9201, die in de centrale meld- en regelkamer te Schiedam is opgesteld. Elke minuut worden alle detectors door de computer afgetast. De SO_2-concentraties worden berekend uit de ontvangen meetsignalen en de nulstroom- en ijkwaarden, die in het geheugen van de computer worden bewaard. Zoals reeds is vermeld, worden de nul- en ijksignalen tweemaal daags geregistreerd.

De computer verricht nog verschillende berekeningen die in het bijzonder ertoe dienen de gemeten concentraties te corrigeren voor de invloed van plaats, tijd, windrichting en seizoen. Om te beginnen wordt van de SO_2-concentraties elk uur het uurgemiddelde $\bar{c}$ bepaald. Vervolgens wordt van alle uurgemiddelden $\bar{c}$ die betrekking hebben op een zelfde plaats, een zelfde tijd en een zelfde windrichting, nogmaals een gemiddelde $\bar{\bar{c}}$ berekend. Dit gebeurt volgens een glijdende schaal over een periode van ongeveer drie maanden, dat wil zeggen dat er een gewogen gemiddelde bepaald wordt waarbij de gewichtsfactor kleiner genomen wordt naarmate men verder in het verleden teruggaat, en vrijwel nul is als het tijdsverschil meer dan drie maanden bedraagt. Op deze wijze corrigeert men voor seizoensinvloeden.

De waarden $\bar{c}$ worden gedeeld door de waarden $\bar{\bar{c}}$ en de computer drukt af de zg. Δ-waarden: $\Delta = (\bar{c}/\bar{\bar{c}}) - 1$. Is Δ groter dan nul, dan is de concentratie groter dan wat „normaal" is voor de betrokken plaats, tijd, windrichting en seizoen. Stijgen de Δ-waarden, gemiddeld over het gehele meetnet, boven bepaalde, door statistische berekeningen vastgestelde waarden, dan wordt een intern alarmsignaal gegeven (*fig. 8*). Als nu het lokale weerstation verwacht dat de heersende weercondities in de komende zes uur zullen voortduren, dan wordt een

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

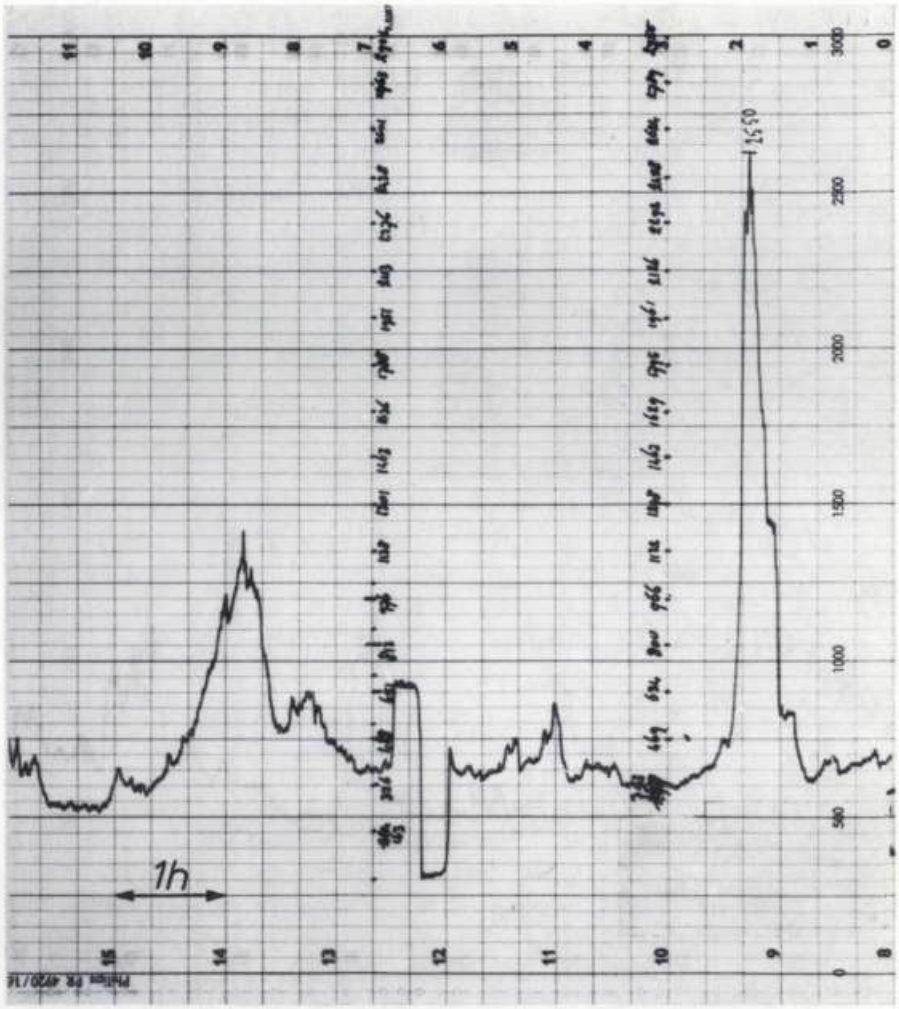


Fig. 8. Het verloop van de SO_2-concentratie op 11 februari 1971, een dag waarop een eerste waarschuwing werd gegeven. De twee verticale rijen cijfers zijn berekende waarden van de concentratie in $\mu g/m^3$; de rechtse rij is gebaseerd op een voorafgaand nul- en ijkniveau, de linkse rij op het nul- en het ijkniveau die in het registrogram te zien zijn.

extern alarm gegeven dat alle industrieën in het Rijnmondgebied waarschuwt. Hiervoor bestaat er een telecommunicatieverbinding (semafoon) tussen de centrale meld- en regelkamer en de verschillende bedrijven. Als niet alleen de Δ-waarden, maar ook de meetwaarden zelf een zekere drempel overschrijden, volgt opnieuw een waarschuwing aan de bedrijven. Sinds het meetnet in 1969 in werking is gesteld, is reeds een twintig maal alarm geslagen.

Na de eerste waarschuwing aan de bedrijven worden alle stankverwekkende werkzaamheden opgeschort die niet direct met de produktie samenhangen, b.v. schoonmaakwerkzaamheden als het doorblazen van pijpleidingen en schoorstenen. Na de tweede waarschuwing gaan de bedrijven over op het stoken van zwavelarme brandstof [9].

Het meetnet wordt ook gebruikt voor het opsporen van sterke bronnen door middel van kruispeilingen, en tevens wordt nagegaan in hoeverre de gemiddelde concentraties in de atmosfeer een neiging tot verandering vertonen („trendmetingen"). Deze veranderingen komen niet tot uiting in de Δ-waarden, maar in de meetwaarden zelf, die voor dit doel gecorrigeerd worden voor de meteorologische omstandigheden.

Samenvatting. Beschrijving van een meetnet voor de meting van SO_2-concentraties in het Rijnmondgebied, bestaande uit 31 detectors die via telefoonlijnen in verbinding staan met een computer Philips P9201. De detectors werken zonder toezicht; eens in de drie maanden krijgen ze een eenvoudige onderhoudsbeurt. De detector werkt volgens het zg. coulometrische principe. Door de meetcel, die o.a. een oplossing van vrij broom bevat, wordt een constante luchtstroom geleid. Het SO_2 in de lucht reageert met dit vrije broom. Het gehalte aan vrij broom wordt constant gehouden doordat het broom dat door het SO_2 verbruikt wordt, met behulp van een elektrolysestroom weer wordt aangevuld. Deze stroom is een maat voor de per tijdseenheid aangevoerde hoeveelheid SO_2. De computer ontvangt elke minuut een meetsignaal van de detector. Ook is het mogelijk een ijksignaal en een nulsignaal te ontvangen. Welk signaal ontvangen wordt, hangt af van de stand van een in de detector aanwezige driewegkraan, die door de computer bediend wordt. De computer berekent de SO_2-concentratie door het meetsignaal te vergelijken met het ijksignaal en het nulsignaal. De computer verricht voorts nog verschillende berekeningen die ertoe dienen de gemeten concentraties te corrigeren voor de invloed van plaats, tijd, windrichting en seizoen. Als de aldus gecorrigeerde waarden, gemiddeld over het gehele Rijnmondgebied, boven een bepaalde, door statistische berekeningen vastgestelde waarde stijgt, wordt een alarmsignaal gegeven.

[8] L. A. Clarenburg, Precision of atmospheric sampling for air pollution levels in cities and in industrial areas, lezing (no. 68-42) gehouden op het 61e jaarlijkse congres van de Air Pollution Control Association, St. Paul (V.S.), 1968.

[9] Sinds kort wordt er ook een waarschuwing gegeven als er klachten binnenkomen over „prikkelende" lucht. De bedrijven wordt dan verzocht alle werkzaamheden die aanleiding kunnen geven tot deze prikkelende lucht, tot een minimum te beperken.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

AVOID,

een korteafstandsradar met groot scheidend vermogen

K. L. Fuller

Sinds lang bestaan voor vliegtuigen dusdanig geperfectioneerde navigatiehulpmiddelen, dat volledig automatische landingen mogelijk zijn. Om van deze middelen zo goed mogelijk profijt te kunnen trekken, is het nodig dat de gronddiensten op een vliegveld ook onder omstandigheden als mist normaal blijven functioneren. Hiertoe hebben de auteur en zijn collega's door originele combinatie van een aantal bekende principes een korteafstandsradar met groot scheidend vermogen ontwikkeld, die de naam AVOID heeft gekregen: Airfield Vehicle Obstacle Indication Device.

Door toenemend gebruik van volledig automatische landingssystemen in de luchtvaart groeit de behoefte om op een vliegveld ook bij zeer slecht zicht een mogelijkheid tot vrij snel autoverkeer te hebben. Na een geslaagde automatische landing zal het vliegtuig van het einde van de landingsbaan naar het platform geleid moeten worden. De „follow me"-auto, die normaal de te volgen route aangeeft, heeft bij dichte mist echter niet voldoende zicht om een groot vliegtuig veilig te kunnen leiden. De route kan weliswaar worden aangegeven met behulp van signalen op kabels, ingegraven in de rijbanen, maar men is er dan nooit zeker van dat deze route vrij is van obstakels. Bovendien vereist de aanleg van een dergelijk systeem veel graafwerk en is het weinig flexibel. In geval van een ongeluk is het uiteraard van belang dat brandweer en ambulance, ook bij eventueel slecht zicht, snel te hulp kunnen komen zonder dat daarbij kans bestaat op een aanrijding met wrakstukken of overlevenden. Hier in het bijzonder is een hulpmiddel voor het besturen van een auto bij zeer slecht zicht noodzakelijk.

De meest aangewezen oplossing leek ons hier een of ander radar-systeem met een scheidend vermogen van 2 m en een bereik van 3-160 m, waarmee een sector van 60° voor het voertuig kan worden overzien. Zowel wat scheidend vermogen als wat prestaties op korte afstand betreft moet een dergelijk systeem dus aanzienlijk beter zijn dan de gebruikelijke radarsystemen. Ook moet de snelheid waarmee het gebied wordt afgetast zo hoog zijn dat flikkeren van het beeld wordt vermeden en dat de informatie in een voldoend hoog tempo binnenkomt om bewegende objecten goed te kunnen volgen.

Tot welke eisen deze wensen aanleiding geven bij de gebruikelijke impuls-radartechnieken is als volgt in te zien. Wil men twee objecten waarvan het verschil in afstand r bedraagt nog gescheiden waarnemen, dan zal de lengte τ van de uitgezonden radarimpuls kleiner moeten zijn dan het tijdsverschil waarmee de reflecties van deze objecten worden waargenomen, of, als c de

K. L. Fuller, B.Sc. (Eng.), medewerker van Mullard Research Laboratories, Redhill, Surrey, Engeland.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

voortplantingssnelheid van de radargolven is: $\tau < r/c$. Voor $r = 2$ m en $c = 3 \times 10^8$ m/s vindt men dan $\tau < 7$ ns. De microgolfgenerator moet dus impulsen leveren met een lengte kleiner dan 7 ns. Het vermogen van de radarzender zal een aantal watts moeten bedragen. Dit is weliswaar mogelijk maar niet eenvoudig. Om een minimaal bereik van 3 m te kunnen halen moet het radarsysteem binnen ca. 5 ns van zenden op ontvangen kunnen overschakelen. Bij de hoge versterking die voor de ontvanger vereist is, geeft dit aanleiding tot problemen.

Doordat de voortplantingssnelheid van geluid 10^6 maal zo klein is als die van radargolven, lijkt een ultrasoon radarsysteem hier een oplossing te kunnen bieden. De impulslengte kan dan dus 10^6 maal zo groot zijn. Een nadeel echter van de veel kleinere voortplantingssnelheid is, dat de informatie niet snel genoeg binnenkomt om een voldoend recent beeld van de omgeving te kunnen leveren. Verder is de absorptie van ultrageluid in lucht zo groot dat een bereik van meer dan 20 m moeilijk te halen is met een zender van een redelijk vermogen. Ten slotte ondervindt een ultrasoon radarsysteem storing door het geluid van straalmotoren.

Daar een impulssysteem, zowel met microgolfstraling als met ultrasone trillingen, dus minder geschikt blijkt te zijn voor radar op zeer korte afstand, hebben wij een systeem ontwikkeld waarbij voor afstandsmeting een continu, in frequentie gemoduleerd microgolfsignaal wordt gebruikt [1].

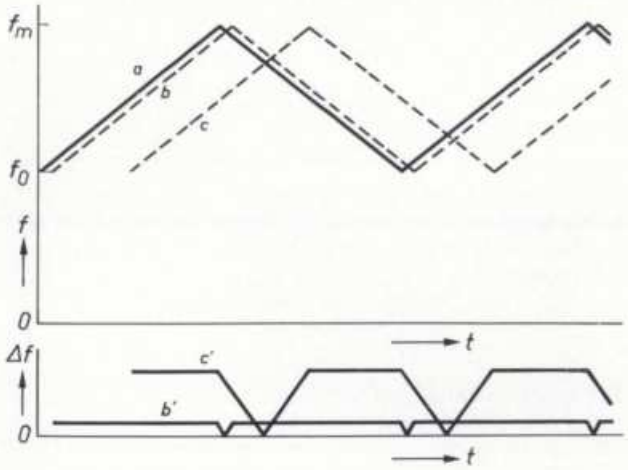


Fig. 1. Het principe van de afstandsbepaling met behulp van frequentiemodulatieradar. Kromme *a* geeft de frequentie *f* van het uitgezonden signaal als functie van de tijd *t*. De reflectie, teruggontvangen van een hindernis, zal ten opzichte van dit signaal in fase verschoven zijn, en wel des te meer naarmate de hindernis verder verwijderd is (krommen *b* en *c*). Worden de gereflecteerde signalen gemengd met een deel van het op het moment van ontvangst uit te zenden signaal, dan ontstaat voor elke reflectie een signaal met de verschilfrequentie Δf (b' en c'). Deze verschilfrequentie zal hoger zijn voor een reflectie aan een ver weg gelegen hindernis dan voor een aan een nabij gelegen hindernis.

Afstandsmeting met frequentiemodulatieradar

De wijze waarop bij ons systeem de afstand wordt gemeten, willen we verduidelijken aan de hand van *fig. 1*. De lijn *a* geeft de frequentie van het uitgezonden signaal als functie van de tijd. De frequentie neemt vanaf een minimumwaarde f_0 lineair met de tijd toe tot een waarde f_m, om dan in hetzelfde tempo weer af te nemen tot f_0; daarna stijgt de frequentie weer, enzovoort.

De frequentie van de waargenomen reflecties zal op dezelfde wijze van de tijd afhangen, maar de fase van de modulatie zal ten opzichte van het uitgezonden signaal verschoven zijn, en wel des te meer naarmate het reflecterende object verder weg ligt (lijnen *b* en *c*). Mengen we nu de gereflecteerde signalen met een deel van het uit te zenden signaal, dan ontstaat een verschilfrequentie die een maat is voor de afstand van het object. Hoe verder een object verwijderd is, hoe hoger de bijbehorende verschilfrequentie (b' en c' in fig. 1). In de praktijk zal een heel spectrum van verschilfrequenties ontstaan. In de buurt van de omkeerpunten van de frequentiezwaai van het uitgezonden signaal gaan de verschilfrequenties naar nul, om daarna weer op hun oorspronkelijke waarde terug te keren. Deze afwijking duurt des te korter, en is daarmee des te minder storend, naarmate de periode van de frequentiemodulatie langer is, vergeleken met de vertragingstijd voor het verst weg gelegen object dat we nog willen waarnemen.

Om een zo efficiënt mogelijk gebruik te maken van de gereflecteerde signalen, zouden we de bijbehorende verschilfrequenties moeten scheiden, bij voorbeeld met een groot aantal filters waarvan de doorlaatbanden overeenkomen met de afstandsintervallen die we willen kunnen onderscheiden. De door elk der filters doorgelaten energie zou dan moeten worden geïntegreerd over de tijd dat het reflecterende object zich op een bepaalde afstand bevindt. De complicaties die een dergelijke batterij filters meebrengt zijn echter groot. Wij besloten daarom gebruik te maken van één verstembaar superheterodyn filter. Door met dit filter periodiek het verschilfrequentie-spectrum af te tasten, wordt de simultaan binnenkomende informatie getransformeerd tot in de tijd na elkaar verschijnende informatie. Het informatie-verlies dat hierbij ontstaat, is dank zij het kleine bereik en de dientengevolge relatief sterke reflecties, nauwelijks van invloed op de prestatie van het radarsysteem.

Voor een groot scheidend vermogen bij de afstandsbepaling zal de frequentieverandering van het radar-

[1] Het ontwerpen, uitvoeren en testen van het hier beschreven radarsysteem is het werk geweest van K. Holford en A. J. Lambell. Een groot deel van het project is uitgevoerd met steun van Mullard Equipment Co. Ltd., Manor Royal, Crawley, Sussex, Engeland.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

signaal zuiver lineair in de tijd moeten zijn. Voor een scheidend vermogen van 1 : 100 moet de lineariteit van de frequentiemodulatie ongeveer 1 % zijn.

Bij impulsradar ligt de radiale aftastsnelheid vast door de looptijd der radarsignalen, bij het AVOID-systeem daarentegen zijn we vrij in de keuze van deze snelheid, omdat zij hier bepaald wordt door de verstemming van bovengenoemd superheterodyn filter. Wanneer de doorlaatfrequentie periodiek driehoekvormig met de tijd verloopt en de antenne tegelijkertijd in een veel langzamer tempo heen en weer zwaait, dan wordt het radarbeeld opgebouwd zoals in *fig. 2a* is weergegeven. Willen we bij deze opbouw een beeldfrequentie van 50 Hz realiseren, dan moet de aftastbeweging van de bundel met deze zelfde frequentie geschieden. Met mechanische antennes is dit nauwelijks

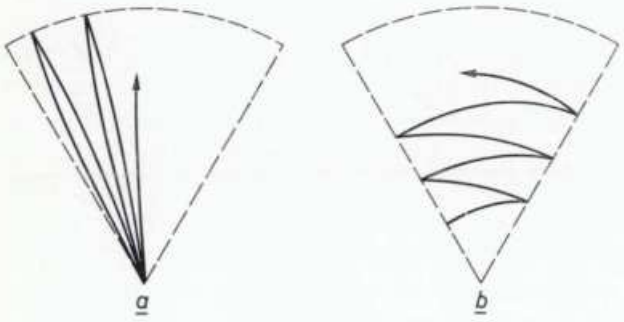


Fig. 2. De wijze waarop het radarbeeld tot stand komt. *a*) De afstandsaftasting is sneller dan de hoekaftasting. *b*) De hoekaftasting is sneller dan de afstandsaftasting.

haalbaar; daarom hebben we onze toevlucht genomen tot elektronische bundelbesturing. Het is het eenvoudigst als we voor deze bundelbesturing dezelfde frequentiemodulatie kunnen benutten die we voor afstandsmeting gebruiken. Nu blijkt, wanneer we de tijden vergelijken die nodig zijn voor aftasting in azimutale en in radiale richting, dat we de frequentiemodulatie alleen dan voor twee doeleinden tegelijk kunnen gebruiken wanneer de hoekaftasting door de bewegende bundel sneller geschiedt dan de radiale aftasting door het superheterodyne filter. Het radarbeeld komt dan tot stand volgens de in fig. 2*b* getekende lijn. Per beeld moet de radarbundel hiervoor 80 heen en weer gaande bewegingen maken, zodat nu voor 50 beelden per seconde deze beweging een frequentie van 4 kHz moet hebben.

Snelheid van azimutale en radiale aftasting

In een systeem waarin de bundelbeweging verkregen wordt met behulp van een in frequentie gemoduleerd signaal, moet steeds wanneer de bundel over éénmaal zijn openingshoek is verdraaid, weer de volle bandbreedte beschikbaar zijn die voor het gewenste radiale scheidende vermogen is vereist. Is dit scheidend vermogen r, dan is, bij een voortplantingssnelheid c, het hiermee corresponderende tijdsverschil $2r/c$ en de bandbreedte b vereist voor het verwerken van deze informatie is $c/2r$. Bij een bundelopening θ en een totale hoek ϕ die overzien moet worden is het aantal essentieel verschillende bundelposities $N = \phi/\theta$. De totale bandbreedte nodig voor het overbrengen van de informatie voor één radarbeeld wordt dan: $B = Nb = (\phi/\theta)\,(c/2r)$. We kiezen de bundelopening zodanig dat het scheidend vermogen in radiale en in azimutale richting gelijk is op $\frac{1}{3}$ van het maximale bereik R; dus $\frac{1}{3}R\mathrm{tg}\theta \approx \frac{1}{3}R\theta = r$. Voor de totale bandbreedte die nodig is kunnen we nu dus schrijven: $B = (R\phi/3r)\cdot(c/2r) = cR\phi/6r^2$. Wanneer nu de frequentiemodulatie van het signaal tussen f_0 en f_m verloopt volgens $f = f_0 + f't$, dan is de tijd t_A die nodig is voor één aftastbeweging in azimutale richting:

$$t_A = \frac{B}{f'} = \frac{cR\phi}{6f'r^2}.$$

Deze tijd zullen we gaan vergelijken met de tijd nodig voor een aftasting in radiale richting.

Het tijdsverschil Δt tussen het uitzenden van een signaal en het ontvangen van de reflectie aan een object op de minimaal waarneembare afstand r_0 bedraagt $2r_0/c$. Bij de door ons gekozen vorm van de frequentiemodulatie resulteert dit in een frequentieverandering, en dus in een verschilfrequentie in het detectiecircuit, gelijk aan $f'\Delta t = f' \cdot 2r_0/c$. Om deze verschilfrequentie te kunnen bepalen, moet de trilling ten minste gedurende ongeveer twee perioden kunnen worden waargenomen. Voor de hiervoor nodige tijd τ geldt dus $\tau \geqq 2 \cdot c/(f'2r_0) = c/(f'r_0)$. Voor elk verder weg gelegen object is de verschilfrequentie hoger en is dus de tijd τ ruimschoots lang genoeg voor frequentiebepaling. Het aantal elementen in radiale richting bedraagt $M = (R-r_0)/r \approx R/r$, aangezien $R \gg r_0$. Voor de totale tijd t_R voor eenmaal aftasten van het hele afstandsbereik geldt dus:

$$t_R = M\tau \geqq \frac{R}{r}\frac{c}{f'r_0}.$$

We kunnen nu de twee mogelijkheden nagaan.

a) Afstandsaftasting sneller dan de hoekaftasting (fig. 2*a*). Er zijn dan N afstandsaftastingen voor één hoekaftasting en de daarvoor beschikbare tijden moeten dus voldoen aan $N\,t_R = t_A$, of

$$N\frac{R\,c}{f'rr_0} \leqq \frac{cR\phi}{6f'r^2},$$

waaruit na enige omvormingen volgt:

$$2R \leqq r_0,$$

hetgeen duidelijk een onmogelijkheid is.

b) Hoekaftasting sneller dan de afstandsaftasting (fig. 2*b*). In dit geval zijn er M hoekaftastingen per afstandsaftasting, of wel er moet gelden $Mt_A = t_R$, wat aanleiding geeft tot de ongelijkheid

$$\frac{RcR\phi}{r6f'r^2} \geqq \frac{R\,c}{f'rr_0}.$$

Dit levert uiteindelijk $r_0 \geqq 2r/N$, hetgeen zeer wel mogelijk is wanneer we bij voorbeeld $r_0 = 4$ m en $r = 2$ m kiezen.

De antenne

Een bekende constructie voor een radarantenne waarvan de richting van de uitgestraalde bundel elektronisch is te variëren, gaat uit van het interferentieprincipe. De antenne bestaat dan niet uit één enkel stralend element, maar uit een aantal op een rij geplaatste elementen. Door interferentie van de door deze elemen-

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

ten uitgezonden straling ontstaat een bundel in een richting, bepaald door de positie van de stralers en de fasebetrekking tussen deze stralers [2]. Wanneer we nu gebruik maken van geschikte frequentieafhankelijke fasedraaiers, dan ontstaat de mogelijkheid om de voor de afstandsmeting gebruikte frequentiemodulatie tevens te gebruiken voor het verkrijgen van de aftastbeweging van de radarbundel.

Voor ons geval is de simpelste uitvoeringsvorm van een dergelijke antenne een stuk rechthoekige golfpijp voor 3-cm-golven, waarin in een van de brede zijden op regelmatige afstanden gaten zijn geboord. De antenne wordt aan één uiteinde met hoogfrequentenergie gevoed; deze energie loopt door de golfpijp, waarbij door elk gat steeds een fractie van de energie wordt uitgestraald. Om nu te bereiken dat alle gaten even sterk stralen, moet de diameter van de gaten vanaf het voedingseinde van de pijp regelmatig toenemen. De aan het andere uiteinde van de pijp nog resterende energie wordt daar door een belasting geabsorbeerd. De golflengte in de pijp, λ_g, is groter dan de golflengte λ_0 van van elektromagnetische straling met dezelfde frequentie in de vrije ruimte. Is nu de afstand van de gaten in de golfpijp gelijk aan λ_g behorende bij een zekere frequentie, dan zal wanneer de antenne gevoed wordt met h.f.-energie van deze frequentie, de energiestroom ter plaatse van de gaten onderling in fase zijn, en de antenne zal een bundel uitzenden loodrecht op de golfpijp. Verandering van de voedingsfrequentie geeft een verandering van λ_g, zodat nu de gaten met een zeker onderling faseverschil stralen; dit resulteert in een afwijken van de bundel uit de loodrechte stand.

Wanneer, zoals in boven beschreven situatie het geval is, de afstand der gaten groter is dan λ_0, zullen, bij gelijke fase van de straling der gaten, behalve de loodrecht op de antenne staande hoofdbundel ook nog bijbundels optreden. Nemen we eenvoudigheidshalve even aan dat we een antenne hebben bestaande uit slechts twee elementen, met een afstand l, dan is de voorwaarde voor het optreden van een bundel die een hoek ϕ met de normaal maakt: $l \sin \phi = n\lambda_0$ (n geheel). Is nu $l > \lambda_0$, dan zal deze betrekking behalve de oplossing voor $n = 0$, die overeenkomt met de hoofdlus, ook voor $n \neq 0$ reële oplossingen hebben. Dit zijn de zijlussen in het stralingsdiagram van de antenne, die doorgaans ongewenst zijn. We kunnen aan deze situatie ontkomen door de golfpijp te vullen met een diëlektricum, waardoor λ_g kleiner wordt en we dus ook de afstand der gaten kleiner kunnen maken. Is de diëlektrische constante van dit vulmateriaal voldoende groot, dan is het mogelijk om λ_g kleiner te maken dan λ_0, zodat dan $l \sin \phi = n\lambda_0$ slechts voor $n = 0$ een reële oplossing heeft; de zijlussen zijn dan verdwenen.

Wij hebben de golfpijp gevuld met een materiaal met $\varepsilon_r = 2{,}54$. Hierdoor wordt voor het hele frequentiegebied van 8-11 GHz bereikt dat $\lambda_g < \lambda_0$ is. Door de hoge diëlektrische constante van dit materiaal is de intensiteit van de straling door de gaten kleiner dan zonder diëlektricum het geval zou zijn. Om hierin verbetering te brengen, is ook aan de buitenkant van de golfpijp een laag diëlektrisch materiaal over de gaten aangebracht.

Voor een antenne met meer dan twee elementen is de situatie nogal wat gecompliceerder en zullen er ook wanneer de afstand der elementen kleiner is dan λ_0, zijlussen blijven optreden, zij het met veel geringere intensiteit dan voor $\lambda_g > \lambda_0$. De situatie is te verbeteren door de elementen met ongelijke intensiteit te laten stralen [3]. Aangezien de stralingsintensiteit van een gat afhangt van zijn grootte, kunnen we dit bereiken door de diameter van de gaten naar het eind van de antenne toe kleiner te maken.

Er was echter al een reden om de gaten naar het eind van de antenne toe groter te maken. Deze beide argumenten resulteren in een bepaald verloop in diameter voor de gaten in de golfpijp. Bij een totale lengte van 1,5 m heeft de antenne ca. 80 gaten. Zouden we ieder gat nauwkeurig de optimale diameter willen geven, dan betekent dit dat we hiervoor 80 verschillende boren moeten hebben, waarvan de meeste buiten de gebruikelijke standaardseries vallen. In de praktijk blijkt dat wanneer we de 80 gaten in 10 groepen verdelen, elk corresponderend met een standaard-boorafmeting, de antenne vrijwel even goed werkt als wanneer we ieder gat de berekende diameter geven. Voor de vervaardiging van de antenne betekent dit uiteraard een belangrijke vereenvoudiging.

In de situatie waarin de bundel loodrecht op de antenne staat is niet alleen de straling van alle gaten in fase, maar ook de geringe reflecties die deze gaten in de golfpijp veroorzaken zijn dan in fase. Dit wil zeggen dat dan in de golfpijp een staande golf ontstaat, waardoor het rendement van de antenne vermindert. Bij alle andere standen van de bundel zijn de reflecties uit fase en is hun vectorsom zo klein dat de resulterende staande golf niet hinderlijk is. De antenne is daarom zo geconstrueerd dat de bundel door de frequentiezwaai van 11 naar 8 GHz die nodig is voor de afstandsbepaling, beweegt van 5° met de normaal naar 65° met de normaal. De antenne moet dan onder een hoek van 35° met de voorzijde van het voertuig worden gemonteerd.

De stromen in de wand van de golfpijp volgen in ons geval het in *fig. 3* gegeven patroon. Brengen we de gaten aan in de brede zijde van de golfpijp, dan moeten

[2] A. Meijer, Een analogon-rekenmachine voor het nabootsen van eendimensionale antennesystemen, Philips techn. T. **31**, 2-16, 1970 (no. 1).

[3] Zie fig. 15 in het in [2] aangehaalde artikel.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

zij, om maximaal te stralen, naast het midden van die zijde liggen. Tevens kunnen we dan aan de andere kant van het midden een tweede rij gaten aanbrengen, over de halve gatenafstand ten opzichte van de eerste verschoven. De beide rijen stralen dan in dezelfde fase en zullen elkaar versterken, zodat een aanmerkelijke verbetering van het rendement van de antenne wordt bereikt.

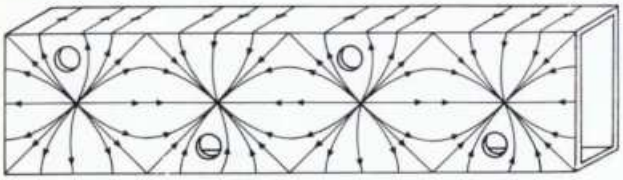


Fig. 3. Het stromenpatroon in de wand van de als antenne gebruikte golfpijp. De gaten verstoren dit patroon en zullen daardoor energie uitstralen. Aangezien de stromen rondom de aan weerszijden van het midden aangebrachte gaten een zelfde patroon vertonen, zullen de beide rijen gaten met dezelfde fase stralen.

Fig. 4. De antenne op het dak van een voertuig gemonteerd. Duidelijk is de golfpijp te zien die zich in de brandlijn van de parabolisch-cilindrische reflector bevindt, met rechts de energietoevoer en links de afsluitweerstand ter absorptie van de aan dit uiteinde nog resterende hoogfrequentenergie. Achter de voorruit ziet men het als monitor gebruikte televisietoestel.

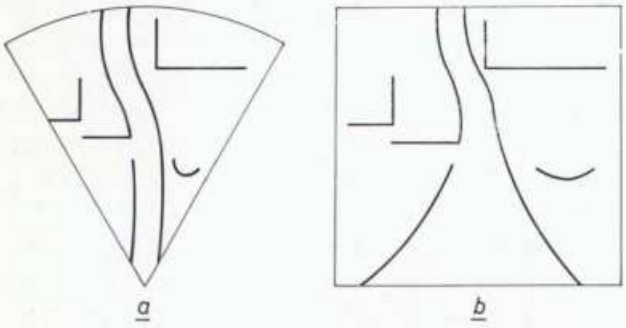


Fig. 5. Het radarbeeld (schematisch). *a*) Op de normale wijze weergeven: de afstand van een hindernis uitgezet als voerstraal in de bijbehorende richting. Er ontstaat een plattegrond van de omgeving. *b*) De voor de AVOID-radar gebruikte wijze van weergeven: de afstand van een hindernis wordt verticaal uitgezet als functie van de als horizontale coördinaat gebruikte hoek waaronder de hindernis wordt waargenomen. Het resultaat is een perspectivische weergave van de omgeving.

Om de bundelopening in verticale richting te beperken, hebben we de golfpijp in de brandlijn van een parabolisch-cilindrische reflector geplaatst. De gaten in de golfpijp stralen achterwaarts en de reflector werpt vervolgens de straling in een nauwe bundel voorwaarts. De hoofdlus van het stralingsdiagram van deze opstelling heeft een verticale opening van 10°. Dit is te klein om vanaf een hoogte van ca. 2 m het hele gebied van 3 tot 160 m voor de auto te kunnen overzien. De antenne is nu zo opgesteld, dat de hoofdlus het verder af gelegen deel van het bereik bestrijkt, terwijl de dichterbij gelegen delen bestreken worden door verticale zijlussen. Dat deze zijlussen veel minder intensief zijn dan de hoofdlus is geen bezwaar: door de sterkere reflecties van nabijgelegen hindernissen wordt dit verschil ruimschoots gecompenseerd. *Fig. 4* toont de antenne, gemonteerd op een auto.

Het beeldscherm

Bij de gebruikelijke radarsystemen wordt de afstand van een object op het beeldscherm van een katodestraalbuis uitgezet als voerstraal in de bijbehorende richting. Er ontstaat op deze manier een plattegrond van de omgeving (*fig. 5a*). Het is evenwel ook mogelijk de gemeten afstanden verticaal op het scherm uit te zetten, waarbij dan als horizontale coördinaat de waarnemingsrichting wordt gebruikt. Het radarbeeld van hetzelfde uitzicht als in fig. 5*a* wordt dan weergegeven als in fig. 5*b*; dit beeld vertoont min of meer de normale perspectivische verhoudingen. Een geringe correctie op de schaal waarop de afstanden worden uitgezet is voldoende om een zo goed als natuurgetrouw beeld te verkrijgen. Deze wijze van weergeven is hier eenvoudig te realiseren: de beide signalen die een maat zijn voor hoek en afstand, zijn al in het systeem aanwezig.

Het zou uiteraard plezierig zijn als we het perspectivische beeld op de autovoorruit projecteerden, zodat het tot dekking kon worden gebracht met het normale uitzicht. Dit wordt evenwel een zeer kostbare aangelegenheid, en bovendien, omdat het tot dekking brengen van het radarbeeld met het uitzicht maar voor één vaste positie van de waarnemer is te verwezenlijken, is het daarbij nodig het hoofd van de bestuurder te fixeren. Wij hebben daarom dan ook volstaan met het weergeven van de informatie op een katodestraalbuis die zo is geplaatst dat de bestuurder slechts weinig opzij behoeft te kijken voor het zien van het beeldscherm.

Het komt voor, dat grote metalen voorwerpen zo sterk reflecteren dat de uitgezonden straling verschei-

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

dene malen tussen zo'n voorwerp en de voorzijde van de radarwagen weerkaatst. Iedere weerkaatsing wordt dan door het systeem weergegeven als een op een veelvoud van de afstand van het oorspronkelijke voorwerp liggende hindernis. Ook kan het zijn dat door sterke reflecties oversturing van de ontvanger optreedt, waardoor hogere harmonischen in het signaal optreden. Dit geeft dan eveneens aanleiding tot schijnbare hindernissen op een veelvoud van de afstand van de werkelijke hindernis. Aangezien al deze storingen aanleiding geven tot schijnbare hindernissen die verder weg gelegen zijn dan de werkelijke, geeft dit voor de bestuurder geen problemen.

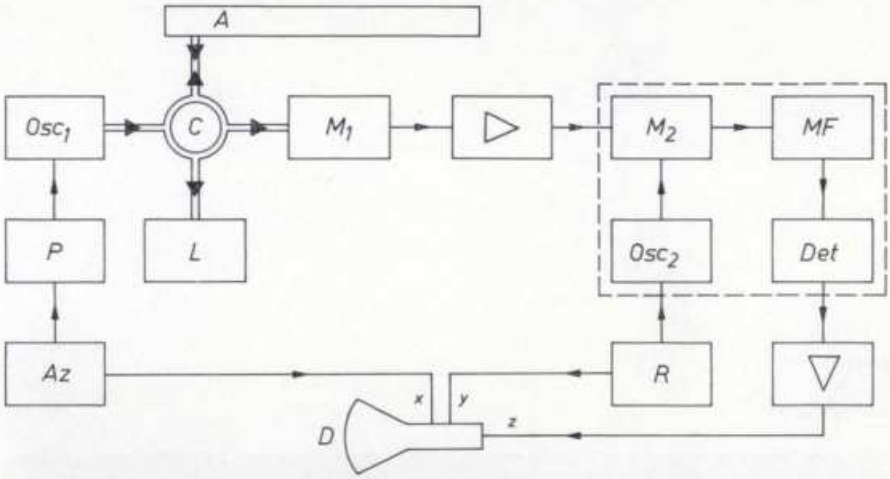


Fig. 6. Blokschema van het AVOID-radarsysteem. Osc_1 „backward wave oscillator". *P* voeding van de oscillator. *Az* driehoekspanningsgenerator voor modulatie van het door de oscillator geleverde h.f.-signaal. *C* circulator. *A* antenne. M_1 mengtrap waarin de gereflecteerde signalen gemengd worden met een door de circulator doorgelaten deel van de oscillatorenergie. De vierde arm van de circulator is afgesloten met een weerstand *L*. Osc_2 hulposcillator, in frequentie gemoduleerd met de door de generator *R* geleverde driehoekspanning. M_2 mengtrap. *MF* middenfrequentversterker. *Det* detector. De onderdelen binnen de streeplijn vormen een verstembaar filter. *D* beeldscherm, met *x*: horizontale afbuiging, *y*: verticale afbuiging en *z*: intensiteitsregeling van de elektronenbundel.

Experimentele uitvoering van de AVOID-installatie

Een blokschema van de AVOID-radarinstallatie is gegeven in *fig. 6*. De „backward wave oscillator" Osc_1 wordt in frequentie gemoduleerd over het gebied van 8-11 GHz door moduleren van zijn voedingsspanning. Hiertoe levert de hoekaftastgenerator *Az* een periodiek driehoekvormig stuursignaal met een frequentie van 2,5 kHz. Het verband tussen voedingsspanning en frequentie van de „backward wave oscillator" is exponentieel, zodat een correctienetwerk moet worden opgenomen ten einde een lineair verband tussen stuursignaal en frequentie te verkrijgen. Het uitgangsvermogen van de oscillator gaat via een circulator *C*, die een brede doorlaatband heeft, naar de antenne, een klein deel gaat direct naar de detectieapparatuur als referentiesignaal voor de afstandsmeting.

In totaal wordt een vermogen van 10 mW uitgestraald; dit komt neer op een gemiddeld vermogen van 3 μW in een frequentieband ter breedte van 1 MHz. Voor de hier beschreven radarinstallaties is geen frequentiegebied toegewezen, maar gezien het geringe vermogen mag worden aangenomen dat tegen gebruik van de installatie uitsluitend in geval van nood, geen bezwaar zal bestaan.

De reflecties gaan van de antenne *A* via de circulator naar een mengtrap M_1, waar zij met bovengenoemd referentiesignaal worden gemengd. De zo verkregen verschilfrequenties worden versterkt, waarbij de hoge frequenties, afkomstig van reflecties aan objecten op grotere afstand, meer worden versterkt dan de lage frequenties.

De volgende vier blokken in het schema vormen samen het eerder genoemde superheterodyne filter waarmee het frequentiespectrum, dat in feite een afstandsspectrum is, wordt afgetast volgens een driehoekvormig patroon. Na detectie en versterking wordt het signaal gebruikt voor helderheidsmodulatie van de weergeefbuis *D*. De horizontale en verticale afbuigsignalen voor de weergeefbuis worden geleverd door de hoek- en afstandsaftastgeneratoren *Az* en *R*.

De frequentie van de hoekaftastgenerator is 2,5 kHz, die van de afstandsaftastgenerator 50 Hz. Het hele gebied wordt dus afgetast met een frequentie van 50 Hz. Het azimutaal scheidend vermogen is 2° bij een totale zwaai van 60°, zodat er 30 beeldelementen in azimutale richting zijn. Radiaal is het scheidend vermogen 2 m en het totale bereik 160 m; in deze richting zijn er dus 80 beeldelementen, zodat het hele radarbeeld wordt opgebouwd uit 2400 elementen. Als weergeefsysteem

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

hebben wij bij onze experimenten een voor het doel aangepast draagbaar televisietoestel gebruikt. *Fig. 7* toont het uitzicht dat de bestuurder heeft. (Dezelfde apparatuur kan ook 25 beelden per seconde leveren. Het aantal beeldlijnen op de weergeefbuis wordt dan verdubbeld. Ten koste van enig flikkeren van het beeld wordt zo schijnbaar een beter scheidend vermogen verkregen.)

Bij een uitvoerige praktische beproeving van het systeem bleek voor de chauffeur een korte oefenperiode voldoende, waarna het radarbeeld als bijzonder nuttig ervaren werd. Met blindrijden, waarbij de voorruit volledig werd afgedekt, hebben wij proeven genomen op een omheind parkeerterrein en op een verlaten vliegveld. Hoewel de bestuurder zijn gevoel voor richting volkomen verloor bij gebrek aan uitzicht, kon een botsing met elk van de vele aanwezige obstakels vermeden worden. Een met hoekreflectors gemarkeerde route was eenvoudig te volgen. Van een andere blindrijd-demonstratie is een beeld gegeven in de titelfoto. De radarwagen, waarvan de voorruit weer is geblindeerd, leidt hier een colonne brandweerwagens.

Fig. 7. Het uitzicht op een parkeerterrein met daaronder het bijbehorende beeld op het radarscherm in de auto. Voor het scherm is een doorzichtige plaat aangebracht met daarop een afstandsschaal en twee gebogen lijnen die de randen van de voor de auto nodige vrije doorgang aangeven.

Samenvatting. Om ook bij slecht zicht autoverkeer op een vliegveld mogelijk te maken, is een radarsysteem ontwikkeld met een bereik van 3-160 m, een scheidend vermogen van 2 m en een beeldfrequentie van 50 Hz. De afstandsbepaling geschiedt met een continu signaal, dat driehoekvormig in frequentie is gemoduleerd. Met behulp van een antennesysteem bestaande uit een groot aantal (ca. 80) stralende gaten in een golfpijp levert dezelfde frequentiemodulatie een elektronische bundelbesturing. Op deze wijze wordt een trage, mechanische antenne vermeden en is een beeldfrequentie van 50 Hz te realiseren, wat nodig is voor een bij daglicht zichtbaar, niet flikkerend radarbeeld. Door de golfpijp te vullen met een diëlektricum worden ongewenste zijlussen in het stralingsdiagram van de antenne onderdrukt. Een analyse van de parameters van het radarsysteem laat zien dat bij het gebruik van dezelfde frequentiemodulatie voor afstandsmeting en bundelbesturing de hoekaftasting sneller moet zijn dan de radiale aftasting.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Parametrische versterkers voor een radioastronomische interferometer

R. Davies en R. E. Pearson

Het is op het ogenblik mogelijk parametrische versterkers voor microgolven te maken waarvan de diode-ruistemperatuur niet boven 10 K ligt als zij tot de temperatuur van vloeibare stikstof worden afgekoeld. Voor toepassingen als in de radioastronomie zijn zulke versterkers praktischer dan masers, die gecompliceerder van aard zijn en een ingewikkelder koelsysteem vragen, daar zij bij de temperatuur van vloeibaar helium werken. Het hierna volgende artikel beschrijft een gekoeld systeem van parametrische versterkers voor de radio-interferometer te Defford in Engeland.

Inleiding

In de radioastronomie is het vaak van belang om een zwakke bron van radioruis te kunnen vinden en zijn openingshoek te kunnen meten. Het is duidelijk dat voor het opsporen van zulke zwakke bronnen de ingangstrap van het ontvangsysteem zeer weinig ruis moet hebben; de openingshoek van de bron kan met behulp van een interferometerschakeling worden gemeten. Een radio-interferometer heeft twee antennes, elk met zijn eigen ontvanger; de genoemde openingshoek wordt bepaald door de antennes op de bron te richten en het verloop van de uitgangsruis te meten als functie van de onderlinge afstand der antennes [1].

De radioruis die de aarde uit zulke bronnen ontvangt ligt in het gebied der microgolven, en de radio-interferometer moet dus voor microgolven zijn gebouwd. Daar de achtergrondruis die ons uit de verre ruimte bereikt buitengewoon zwak is, kan het systeem met veel voordeel van een ruisarme versterker gebruik maken. De eerste ruisarme versterker die in zulke systemen werd gebruikt was de maser [2], waarvan de effectieve ingangsruistemperatuur [3] bij ongeveer 6 K kan liggen. Niettegenstaande zijn lage ruistemperatuur heeft de maser echter twee grote nadelen. Hij vereist namelijk ingewikkelde en dure hulpapparatuur, in het bijzonder die welke nodig is voor de koeling tot de temperatuur van vloeibaar helium, en verder kan hij nooit een grote bandbreedte hebben. De maser bracht de ontwerper van microgolfsystemen in aanraking met de opvallende voordelen van ruisarme apparaten en overtuigde hem tevens van de grote wenselijkheid om die te vereenvoudigen en zo mogelijk een grotere bandbreedte te geven, zelfs al zou de ruistemperatuur daardoor iets hoger uitvallen.

In het midden der jaren vijftig werd met het werk aan zulk een apparaat begonnen. De toenmalige parametrische versterker was gebaseerd op het gebruik van de varactor, d.i. een diode met variable capaciteit [4] [5]. De toegepaste reactieve methode van energieoverdracht [6] deed een laag ruisniveau verwachten en de varactordiode zelf was heel klein en zeer geschikt om in microgolfschakelingen te worden gebruikt. Sinds die tijd is er een grote vooruitgang geboekt en de

R. Davies, Ph. D., en R. E. Pearson, B. Sc., Grad. Inst. P., zijn medewerkers van Mullard Research Laboratories, Redhill, Surrey, Engeland.

[1] Dit beginsel en de toepassing daarvan op optisch waarneembare sterren zijn reeds eerder in dit tijdschrift behandeld: R. Hanbury Brown en A. Browne, De ster-interferometer te Narrabri, Philips techn. T. **27**, 197-216, 1965/66.

[2] De masers voor de radioastronomische interferometer te Defford bij Malvern in Engeland zijn beschreven in: F. W. Smith, P. L. Booth en E. L. Hentley, Masers voor een radioastronomische interferometer, Philips techn. T. **27**, 317-326, 1965/66.

[3] De effectieve ingangsruistemperatuur (deze wordt vaak de versterkerruistemperatuur genoemd) is die temperatuur waarop de ingangsafsluiting moet worden gebracht om per eenheid van bandbreedte een uitgangsruisvermogen te produceren dat tweemaal zo groot is als het vermogen dat zou optreden als die afsluiting tot het absolute nulpunt zou worden afgekoeld.

[4] H. Heffner en G. Wade, Gain, bandwidth and noise characteristics of the variable-parameter amplifier, J. appl. Phys. **29**, 1321-1331, 1958.

[5] C. S. Aitchison, Parametrische versterkers met laag ruisniveau, Philips techn. T. **28**, 304-310, 1967.

[6] Een van de eersten die inzagen dat het gebruik van niet-lineaire capaciteiten mogelijkheden tot het bereiken van een laag ruisniveau opleveren, was A. van der Ziel, destijds verbonden aan Philips' Natuurkundig Laboratorium. Zijn artikel: On the mixing properties of non-linear condensers, J. appl. Phys. **19**, 999-1006, 1948, behoort thans tot de klassieke literatuur op dit gebied.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Copyright Controller HBMSO.

Fig. 1. Een van de twee antennes voor de radio-interferometer te Defford bij Malvern in Engeland. Om de lengte en de richting van de basislijn te kunnen variëren, heeft iedere antenne zijn eigen dubbel stel railsporen waarover hij kan worden voortbewogen: de twee stellen sporen snijden elkaar onder een hoek van 67°. De twee antennes worden op een radiobron gericht en de ontvangen ruis wordt voor iedere antenne in een apart kanaal versterkt. De eerste versterktrap is een parametrische versterker met varactordiode, waardoor de ruisbijdrage van de ontvanger klein is. Uit de meting van de correlatie van de uitgangsruis als functie van de afstand tussen de antennes wordt de openingshoek van de ruisbron bepaald. Op de drievoet staat de extra reflector van de Cassegrain-voeding.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

parametrische versterker heeft de maser afgelost in nagenoeg alle toepassingen waarvoor een ruisarme versterker voor microgolven wordt vereist. Zelfs bij het gebruik van tamelijk eenvoudige afgestemde kringen is de bandbreedte van de parametrische versterker groter dan die van de maser, en die bandbreedte kan verder worden vergroot door het gebruik van eenvoudige filtertechnieken [7]. De parametrische versterker kan ook bij normale omgevingstemperaturen een zeer goed ruisgetal bereiken, maar in toepassingen waarin hij de maser moet evenaren kan koeling nog niet worden gemist; de vereiste temperaturen zijn echter gewoonlijk niet zo laag dat er vloeibaar helium moet worden gebruikt.

In dit artikel zullen wij de parametrische versterkers beschrijven die ontwikkeld zijn ter vervanging van de maser in de radio-interferometer te Defford (*fig. 1*). Er is voor elk der twee ontvangkanalen een parametrische versterker, die werkt op een frequentie van ongeveer 2,7 GHz. De versterkers worden met behulp van vloeibare stikstof tot 80 K afgekoeld, hetgeen de effectieve ruistemperatuur tot beneden de voorgeschreven waarde van 35 K brengt.

Men zou op het eerste gezicht zeggen dat een microgolfontvanger die is uitgerust met een eerste trap waarvoor de ruistemperatuur 35 K bedraagt, veel minder goede resultaten moet opleveren dan een andere die, met een maser in de eerste trap, een ruistemperatuur van ongeveer 6 K bereikt [2]. We moeten echter bedenken dat ook de delen van het systeem die aan de eerste trap voorafgaan, tot de ruis bijdragen. De antenne van de radio-interferometer in Defford heeft zelf een effectieve ruistemperatuur van 20 K en de antennevoedingslijn een ruistemperatuur van 10 K. Door de versterking van de eerste trap kunnen de ruisbijdragen van de daarna volgende delen van de ontvanger worden verwaarloosd en we mogen dus de totale ruistemperatuur voor de maserontvanger op 36 K stellen, terwijl bij gebruik van een parametrische versterker de totale ruistemperatuur 65 K wordt.

Men kan nu de gevoeligheid van het ontvangsysteem definiëren als de minimaal detecteerbare brontemperatuur ΔT; deze is gelijk aan $T_s(2B\tau)^{-\frac{1}{2}}$, waarin T_s de ruistemperatuur van het ontvangsysteem is, B de bandbreedte van de ontvanger en τ de integratietijd na detectie. Uit de formule blijkt dat bij gebruik van een parametrische versterker de integratietijd na detectie iets meer dan drie keer zo groot moet worden gemaakt om dezelfde minimaal detecteerbare ruistemperatuur te bereiken (altijd bij dezelfde bandbreedte). Dit is een nadeel, maar dit wordt meer dan gecompenseerd door de voordelen van het systeem, waarin geen vloeibaar helium gebruikt wordt en dat daardoor eenvoudiger is en voordeliger in de exploitatie.

De parametrische versterker

Wij zullen allereerst bespreken wat de belangrijkste delen zijn van de parametrische versterker met varactordiode die in dit systeem wordt gebruikt. Het allerbelangrijkste onderdeel is de varactordiode zelf. Dit is een *P-N*-overgang die zich gedraagt als een met de aangelegde spanning variërende capaciteit [8]. Aan de varactordiode ligt een hoogfrequente spanning van frequentie f_p, de pompfrequentie genaamd, die wordt geleverd door een afzonderlijke generator. Onder deze omstandigheden heeft de diode voor kleine signalen het karakter van een met de tijd variërende capaciteit. De gepompte diode vormt het verbindende lid tussen twee delen van een schakeling waarvan het schema is getekend in *fig. 2* en waarin de met de tijd variërende

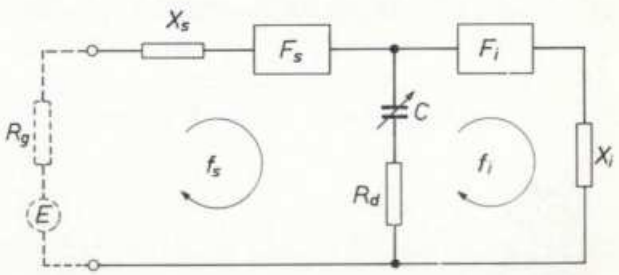


Fig. 2. Principeschakeling van een parametrische versterker. De linker kring is de signaalkring en de rechter de „meeloop"-kring. Zij zijn gekoppeld door een periodiek variërende capaciteit C. Voor deze functie wordt een varactordiode gebruikt, d.i. een diode waarvan de capaciteit afhangt van de aangelegde spanning. De gewenste periodieke capaciteit wordt gerealiseerd door toevoeren van een zg. pompsignaal. (De pompschakeling is niet weergegeven.) De spreidingsweerstand R_d stelt de diodeverliezen voor. De reactantie X_s is aangebracht om de signaalkring te kunnen afstemmen op de frequentie f_s van het signaal dat men wil ontvangen, en met de reactantie X_i kan de resonantiefrequentie f_i van de meeloopkring worden ingesteld. De banddoorlaatfilters F_s en F_i beletten de diverse stromen buiten hun eigen kring te treden. Parametrische versterking treedt op wanneer $f_s + f_i = f_p$, waarbij f_p de frequentie van het pompsignaal is.

capaciteit met C is aangeduid. Voor de overzichtelijkheid is de pompschakeling weggelaten. Het linkerdeel van de schakeling wordt de signaalkring genoemd, omdat deze verbonden is met de signaalbron van frequentie f_s; het rechterdeel van de schakeling, dat alleen met de diode is verbonden, is de zg. meeloopkring (Engels: idler circuit). De reactantie X_s dient om de signaalkring bij de frequentie f_s in resonantie te brengen, de reactantie X_i om de meeloopkring in resonantie te brengen bij de frequentie f_i. Verder dienen de banddoorlatende filters F_s en F_i om te beletten dat er stromen die de signaal- of meeloopfrequentie hebben, buiten hun eigen kring geraken.

[7] B. L. Humphreys, Characteristics of broadband parametric amplifiers using filter networks, Proc. IEE **111**, 264-274, 1964.
[8] Zie blz. 306-307 van het artikel van Aitchison [5].

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Wanneer de resonantiefrequenties en de pompfrequentie zo worden gekozen dat

$$f_s + f_i = f_p, \qquad (1)$$

dan is de met de pompfrequentie variërende capaciteit C in staat om aan de pomp ontleende energie over te dragen bij de frequentie f_s (of bij de frequentie f_i). De schakeling gedraagt zich dan als een versterker [4] [9]. Men drukt dit wel uit door te zeggen dat de schakeling zich voor een ingangssignaal van de frequentie f_s gedraagt als een negatieve weerstand.

Natuurlijk is een schakeling volgens fig. 2 niet zonder meer als versterker bruikbaar, omdat dan het uitgangssignaal op dezelfde klemmen zou verschijnen als het ingangssignaal. Het is daarom beter om in de schakeling een circulator op te nemen, die op de in *fig. 3* aangegeven wijze de binnenkomende en versterkte signalen van elkaar scheidt. (Poort *1* koppelt door naar poort *2*, poort *2* naar poort *3*, enz.). In deze configuratie maakt de negatieve weerstand van de versterker dat de reflectiecoëfficiënt bij de signaalfrequentie groter dan 1 wordt

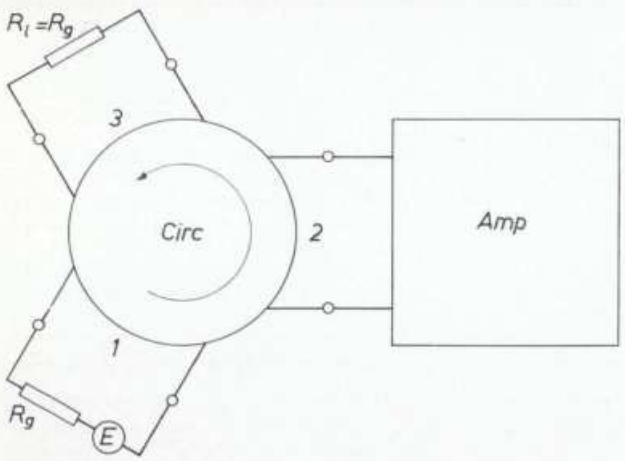


Fig. 3. Het ingangssignaal en het versterkte signaal worden gescheiden door een circulator *Circ*. Deze dirigeert het signaal uit de bron *E* via poort *2* naar de versterker *Amp*, ontvangt het versterkte signaal via dezelfde poort terug en zendt het via poort *3* naar de belasting R_l, die dezelfde impedantie R_g heeft als de bron.

en dat dus, aangezien ingangs- en uitgangssignaal gescheiden zijn, versterking wordt verkregen. Ook verhindert de circulator dat de versterking wordt beïnvloed door veranderingen van de generatorimpedantie.

Aangezien de wijze van energieoverdracht is gebaseerd op een tijdsvariatie van een reactantie die geen thermische ruis veroorzaakt, zou men geneigd zijn te veronderstellen dat de versterker een lage ingangsruistemperatuur heeft. In werkelijkheid is de diode echter geen zuivere reactantie: er is een gering weerstandsverlies (de „spreidingsweerstand"), die veroorzaakt wordt door de weerstand van het ionenrooster tegen de beweging van elektronen en gaten. Deze spreidingsweerstand wordt in het schema van fig. 2 door R_d voorgesteld. Een theoretische analyse die rekening houdt met bronnen van weerstandsruis [9] toont aan dat bij grote versterking (b.v. 10 dB of meer) de effectieve ingangsruistemperatuur T_{amp} van een parametrische versterker van dit type wordt voorgesteld door:

$$T_{amp} = T_d \left[p^{-1} + (1 + p^{-1}) f_s/f_i\right]. \qquad (2)$$

Hierin is T_d de fysische temperatuur van de diode en $p = R_g/R_d$, waarbij R_g de generatorimpedantie is bij de signaalfrequentie f_s. De grootheid p wordt de overkoppelingsverhouding genoemd.

Uit (2) zou men opmaken dat al wat men hoeft te doen om een lage ingangsruistemperatuur te bereiken, niets anders is dan p groot maken en f_s/f_i klein. Helaas zijn p en f_s niet onafhankelijk van elkaar: men kan bewijzen [10] dat voor een hoge waarde van de versterking geldt:

$$f_s f_i (1 + p) = (\gamma f_c)^2, \qquad (3)$$

waarin γ, gedefinieerd als $\gamma = (C_{max} - C_{min}) \times (C_{max} + C_{min})$, een maat is voor de capaciteitsvariatie van de diode, en f_c de afsnijfrequentie, gedefinieerd als $f_c = 1/2\pi C R_d$ [11]. De betrekking wordt afgeleid door te stellen dat de effectieve negatieve weerstand in de signaalkring bij de signaalfrequentie gelijk is aan de totale positieve weerstand, een voorwaarde waaraan bij grote versterking bij goede benadering wordt voldaan. Uit (2) en (3) kan worden afgeleid dat er waarden van p en f_i zijn waarvoor de ruistemperatuur van de versterker minimaal is. Dit minimum is gelijk aan

$$T_{amp\ min} = 2 f_s T_d/\gamma f_c. \qquad (4)$$

De grootheid γf_c kan worden gezien als een kwaliteitscijfer voor de varactordiode, want hij bepaalt de laagste ingangsruistemperatuur die er in een „optimale" versterker mee kan worden bereikt. De optimale meeloopfrequentie is gelijk aan dit kwaliteitscijfer:

$$f_{i\ opt} = \gamma f_c. \qquad (5)$$

Voor de beste diodes die in de handel verkrijgbaar zijn (b.v. de Mullard CXY 10) heeft γf_c een waarde van 40 GHz of meer.

Tussen de energieversterking G en de werkzame bandbreedte B van een parametrische versterker met enkelvoudige afgestemde kringen, zoals geschetst in fig. 2, bestaat de betrekking:

$$G^{\frac{1}{2}} B = 2/(B_s^{-1} + B_i^{-1}). \qquad (6)$$

Hierin is B_s de bandbreedte van de niet-gepompte signaalkring en B_i die van de niet-gepompte meeloopkring. Zoals in de inleiding is aangestipt, kunnen bij dezelfde versterking grotere bandbreedten worden bereikt door het gebruik van eenvoudige filtertechnieken [7] [12].

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Ontwerp en eigenschappen van het versterkersysteem

Het ontwerp van de basisversterker

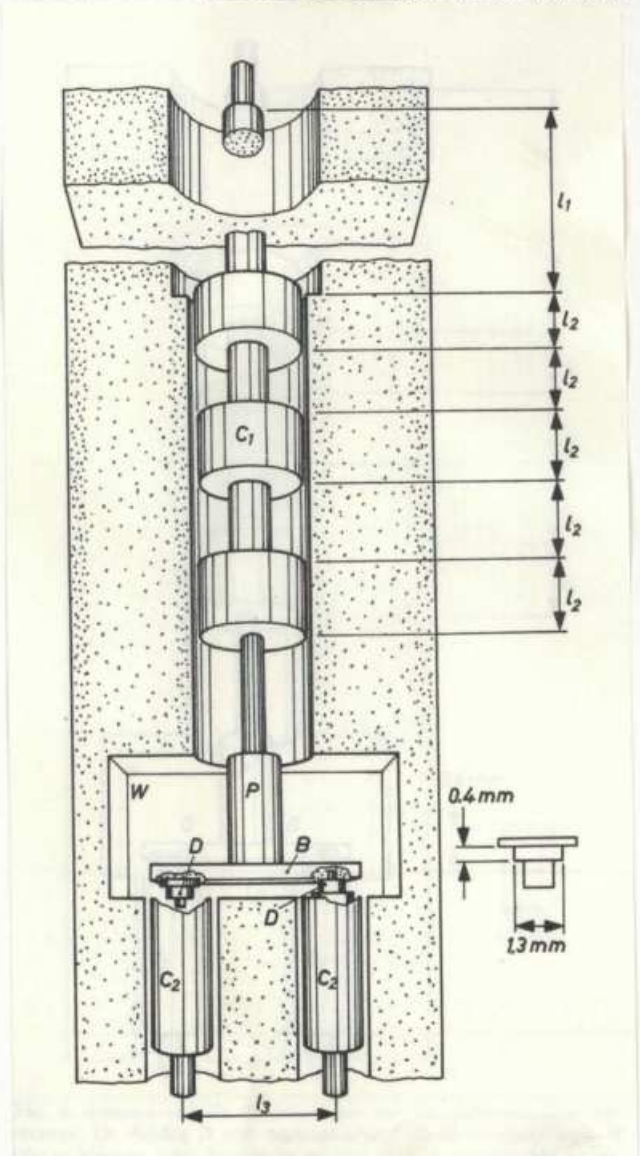
Zoals wij reeds zagen, mocht voor radioastronomische doeleinden de effectieve ingangsruistemperatuur niet hoger zijn dan 35 K. De laagste werktemperatuur voor een door vloeibare stikstof gekoelde diode zou ongeveer 80 K worden, en de versterker moest bij ongeveer 2,7 GHz werken.

Wanneer γf_c op 40 GHz wordt gesteld, volgt uit verg. (4) dat de laagste ruistemperatuur die bij deze frequentie met een tot 80 K gekoelde diode kan worden gehaald, 10,5 K is. Uit de betrekkingen (5) en (1) volgt dat, om dit minimum te bereiken, de meeloopfrequentie ongeveer 40 GHz moet zijn en de pompfrequentie ongeveer 43 GHz. Praktisch was het echter niet zo eenvoudig om een parametrische versterker met een ruistemperatuur beneden 35 K te ontwerpen als deze getallen zouden doen voorkomen. Er was geen geschikte generator die pompenergie (ongeveer 150 mW) kon leveren bij een frequentie van 43 GHz, en de parasitaire elementen van de varactordiode maakten het bezwaarlijk om de meeloopkring te ontwerpen voor een frequentie van 40 GHz. Bovendien moesten bij de ruistemperatuur van 35 K de ruisbijdragen uit andere delen van de parametrische versterker worden inbegrepen, zoals die uit de circulator en uit de microgolfvoedingsleidingen. Zoals wij nog zullen zien, kan de circulator alleen al 10 K aan de ruis bijdragen.

De hoogste frequentie waarvoor een geschikte pompgenerator bestond, was 40 GHz. Volgens (1) moet de meeloopfrequentie dan ongeveer 37 GHz zijn. Het was praktisch niet mogelijk om dit te bereiken, maar de diode CXY 10 heeft een resonantie bij ongeveer 27 GHz door de spreidingszelfinductie die zich in serie met de overgangscapaciteit bevindt. Uit de vergelijkingen (2) en (3) blijkt dat de ruistemperatuur van de zo verkregen, niet-optimale versterker slechts ongeveer 3 K hoger ligt dan de minimumwaarde van 10,5 K. Uit verg. (3) kan worden berekend dat de overkoppelingsverhouding ongeveer 20 moet zijn.

Er was eerder reeds gewerkt aan een ontwerp volgens een beginsel dat bij de diode CXY 10 kon worden gebruikt om afgestemde kringen te maken voor de vereiste signaal-, meeloop- en pompfrequenties. Bij deze aanpak [5] [12] wordt gebruik gemaakt van een tweede diode. In het uiteindelijke ontwerp voor de versterkers voor de radio-interferometer is dit principe inderdaad toegepast. Wij zullen thans het ontwerp van deze versterkers bezien aan de hand van de schematische tekening *fig. 4*.

De twee diodes D zijn geplaatst binnen de pompgolfpijp W, waarbij de boveneinden, met tegengestelde polariteit, verbonden zijn door de vlakke staaf B. (Rechts is een enkele diode vergroot geschetst.) Het midden van de staaf is met de coaxiale ingangsleiding



vinden zich op de staaf B. Ze zijn met deze staaf verbonden in onderling tegengestelde zin. Ze zijn gekoppeld met de signaal-in- en uitgangen (d.w.z. met de circulator) via de inductieve stang P en het systeem van coaxiale leidingen C_1. Dit systeem functioneert bij de signaalfrequentie f_s als dubbele kwartgolftransformator en bij de meeloopfrequentie als stopfilter; $l_1 = \frac{1}{4}\lambda_s$ en $l_2 = \frac{1}{4}\lambda_i$, waarbij λ_s de signaalgolflengte is en λ_i de meeloopgolflengte. De lengte l_3 is gelijk gemaakt aan $\frac{1}{2}\lambda_i$. De coaxiale kringen C_2 zijn laagdoorlatende filters in de schakeling voor het meten van de diodestroom. Rechts een maatschets in een afzonderlijke diode.

[9] L. A. Blackwell en K. L. Kotzebue, Semiconductor-diode parametric amplifiers, Prentice-Hall, Londen 1961.

[10] Zie b.v. C. S. Aitchison, R. Davies en P. J. Gibson, A simple diode parametric amplifier design for use at *S*, *C*, and *X* band, IEEE Trans. **MTT-15**, 22-31, 1967.

[11] C_{max} wordt gewoonlijk gedefinieerd als de capaciteit bij 1 μA stroom in de voorwaartsrichting en C_{min} als de capaciteit bij een keerspanning van 6 V. De afsnijfrequentie f_c kan waarschijnlijk het best worden gedefinieerd bij de waarde die C aanneemt bij een voorspanning nul, maar vaak wordt de afsnijfrequentie opgegeven voor een voorspanning van −6 V.

[12] C. S. Aitchison, R. Davies en C. D. Payne, Bandwidth of a balanced micropill-diode parametric amplifier, IEEE Trans. **MTT-16**, 46-47, 1968.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

C_1 verbonden door de stang P, en aan de onderzijde is elke diode verbonden met een coaxiale leiding C_2. De leiding voor de pompgolf is aangepast afgesloten aan de achterzijde van de diodeopstelling, en in deze leiding bevindt zich eveneens een afstembaar filter (geen van beide zijn in de figuur getekend). Zoals men ziet, bestaat de coaxiale ingangsleiding uit een aantal achter elkaar geschakelde lengten l_1 en l_2 van coaxiale leiding met wisselende diameter van de binnengeleider. Aan de bovenzijde is het coaxiale systeem verbonden met een poort van de circulator (poort *2* uit fig. 3).

We willen nu nagaan in hoeverre deze opstelling overeenstemt met het schema van fig. 2. Op het eerste gezicht is er geen overeenstemming, want er zijn twee diodes. Bij de signaalfrequentie kunnen deze twee diodes echter als een eenheid worden beschouwd, want de staaf die ze verbindt is veel korter dan de golflengte en zorgt dus voor een effectieve parallelschakeling. Het filter F_s is geen afzonderlijk onderdeel; de werking ervan wordt verkregen door C in resonantie te brengen met X_s, die daarom een zelfinductie moet zijn (zie *fig. 5a*). De staaf B en de stang P vormen gezamenlijk een zelfinductie L_1, die tevens fungeert als koppeling voor het overbrengen van de pompenergie naar de diodes. Het hierboven genoemde (in fig. 4 niet getekende) afstembare filter dient voor de aanpassing van de diode aan de pompgenerator.

Bij de meeloopfrequentie vormen de twee diodes eveneens een combinatie, zij het op andere wijze: zij vormen dan een gesloten resonantiekring (zie fig. 5*b*), die met alles wat daarbuiten ligt slechts verbonden is door de variabele capaciteit. Binnen elke diode is de parasitaire zelfinductie L_2 in serieresonantie met de capaciteit C van de overgang; de volledige meeloopkring die zo wordt gevormd, resoneert bij ongeveer 27 GHz. Het element F_1 in fig. 2 geeft dus het filtereffect weer van de twee enkelvoudige afgestemde kringen die de meeloopkring vormen; X_1 stelt de reactantie van de parasitaire zelfinductie voor. Wanneer de twee diodes identiek zijn en in tegenovergestelde zin zijn aangesloten, is de meeloopkring in symmetrisch evenwicht, hetgeen zeggen wil dat er geen spanning staat tussen de beide punten A, die overeenkomen met het uiteinde van het coaxiale systeem in fig. 4. De diodes kunnen niet rechtstreeks worden verbonden, daar zij niet klein zijn vergeleken met de meeloopgolflengte λ_1, die ongeveer 1 cm is; in plaats daarvan zijn zij daarom verbonden door een transmissieleiding die bij de meeloopfrequentie een halve golflengte lang is. (Een leiding van een halve golflengte heeft geen transformatie-effect.) Als constructie bestaat de transmissieleiding uit een microstripleiding, gevormd door de staaf B, en uit de benedenwand van de golfpijp, waarvoor geldt $l_3 = \frac{1}{2}\lambda_1$.

Het coaxiale element C_1 heeft twee functies: het transformeert de ingangsimpedantie naar de juiste waarde en het vormt tevens een laagdoorlatend filter dat het gewenste signaal doorlaat, maar signalen van de meeloopfrequentie tegenhoudt (zulke signalen kunnen optreden als de twee diodes niet geheel identiek zijn). Wij hebben reeds gezien dat een enkele diode gevoed behoort te worden door een signaalgenerator waarvan de impedantie ongeveer twintig maal zo groot is als de

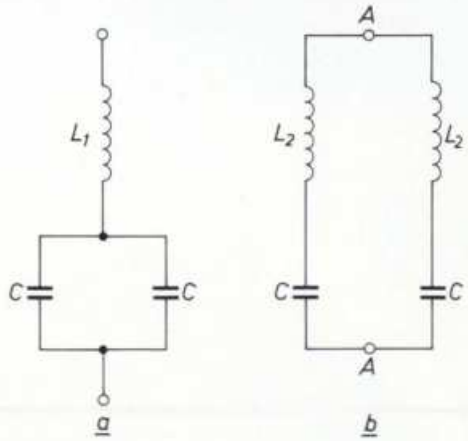


Fig. 5. *a*) Bij de signaalfrequentie f_s kunnen de diodes beschouwd worden als te zijn parallelgeschakeld, daar de staaf die ze verbindt veel korter is dan de signaalgolflengte λ_s. De zelfinductie L_1 van het geheel van staaf en stang komt overeen met de afstemreactantie X_s uit fig. 2, terwijl de serieresonantie van L_1 en de overgangscapaciteit C de filterwerking van F_s oplevert. *b*) Bij de meeloopfrequentie f_1 vormt de combinatie van de twee diodes een gesloten serieresonantiekring. Binnen elke diode is de parasitaire zelfinductie L_2 in serieresonantie met de overgangscapaciteit C. Bij de diode CXY 10 ligt de resonantiefrequentie in de buurt van 27 GHz, en de gehele meelooplus resoneert dus bij deze frequentie. De parasitaire zelfinductie komt hier overeen met de afstemreactantie X_1 uit fig. 2, en de serieresonantie binnen de lus levert de filterwerking van F_1 op. Met twee identieke en in tegengestelde zin aangesloten diodes is deze schakeling symmetrisch en verschijnt er geen meeloopspanning tussen de beide punten A.

spreidingsweerstand R_d. Bij twee effectief parallel geschakelde diodes moet de generatorimpedantie ongeveer 10 R_d zijn, en bij de signaalfrequentie werkt de coaxiale leiding als een dubbele kwartgolftransformator, die de normale 50-ohm-ingangsimpedantie op de juiste waarde brengt. De leiding met lengte l_1, die gelijk is aan een kwart van de signaalgolflengte λ_s, vormt het eerste deel van de transformator, terwijl het tweede deel wordt gevormd door de lijnstukken met lengte l_2 en met afwisselend lage en hoge impedantie. Dit tweede deel van de transformator vormt tevens het laagdoorlatende filter; de lengte l_2 is gelijk gekozen aan een kwart van de meeloopgolflengte, waardoor de meeloopfrequentie wordt tegengehouden maar het gewenste signaal doorgelaten.

Daar de meeloopkring door de symmetrische opstelling en het laagdoorlatend filter goed van de andere kringen is afgeschermd, heeft hij een grote bandbreedte

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

(ongeveer 3 GHz). Hierdoor wordt het gemakkelijker een voldoend grote signaalbandbreedte te bereiken (zie verg. 6), en wordt het ook gemakkelijker de fase van het signaal stabiel te houden bij variaties van de pompfrequentie. De coaxiale leidingen C_2 zijn ook laagdoorlatende filters, die verbinding geven met het meeluistercircuit.

De versterker met circulator

Wij zagen reeds dat in de parametrische versterker een circulator wordt gebruikt om de ingangs- en uitgangssignalen te scheiden. De belangrijkste grootheden van de circulator zijn de *isolatie* tussen poorten waartussen geen koppeling mag optreden en de *demping* tussen gekoppelde poorten. Als de isolatie onvoldoende is treedt er aan de ingangspoort een merkbaar gereflecteerd signaal op en heeft men dus een slechte aanpassing. Demping is in de circulator ongewenst omdat dit verlies aan signaalenergie geeft en daardoor dezelfde uitwerking heeft als een verhoging van de effectieve ingangsruistemperatuur van de ontvanger.

Voor het ontwerp van de apparatuur waren zowel coaxiale als golfpijpcirculators beschikbaar, maar de golfpijpversie gaf de beste resultaten. De laatste was in vierpoortsuitvoering en had een isolatie van 40 dB en een tussenschakeldemping van 0,15 dB. Bij deze grote isolatie is het gereflecteerde signaal aan de ingang voldoende klein (bij een versterking van 20 dB is de spannings-reflectiecoëfficiënt kleiner dan 0,13). Bij kamertemperatuur komt een demping van 0,15 dB overeen met een verhoging van bijna 12 K in ruistemperatuur, hetgeen in ons systeem toelaatbaar is wanneer de overgang van de golfpijp op de coaxiale leiding die versterker en circulator verbindt, gekoeld wordt. De invloed die verliezen in het geheel van versterker en circulator hebben op de ruistemperatuur, bespreken we hieronder. De opstelling van de versterker-circulatoreenheid is schematisch weergegeven in *fig. 6*.

De berekende ruis

In *tabel I* vindt men een opsomming van de fysische temperatuur, de demping en de theoretische ruisbijdrage [9] van elk onderdeel van het parametrische versterkersysteem. (De ruisbijdrage van de versterker zelf wordt natuurlijk berekend uit verg. 2.) Bij optelling van de ruisbijdragen uit de rechterkolom blijkt dat bij een versterking van 23 dB de ruistemperatuur van het versterkersysteem 31 K moet zijn. Sommige onderdelen komen tweemaal in de tabel voor, omdat het signaal ze zowel voor als na versterking doorloopt. De niet-gekoelde delen werden geacht zich op de vrij hoge temperatuur van 320 K te bevinden wegens de warmteuitstraling door het pompklystron; wij komen hierop nog terug.

Thermische voorzieningen

De kryogene apparatuur

De kryogene apparatuur, waarin de gekoelde delen van het versterkersysteem zijn geplaatst, is weergegeven in *fig. 7*. Ten einde het door de gekoelde onderdelen in beslag genomen volume zo klein mogelijk te houden, is een overgang van golfpijp naar coaxiale leiding van het zg. kopse type (Engels: end-fire type) gekozen [13].

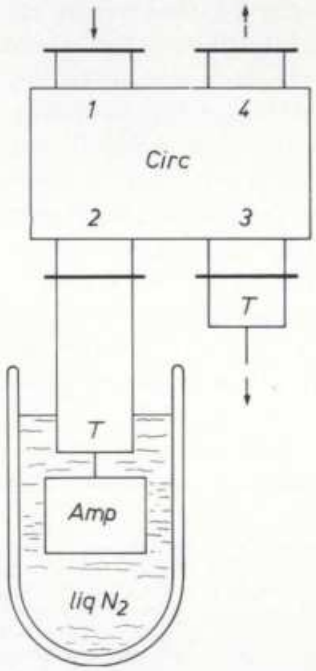


Fig. 6. Schematische voorstelling van versterker en circulator. Het signaal komt binnen op poort *1* van de vierpoortcirculator *Circ*, die zich op kamertemperatuur bevindt. Het komt naar buiten bij poort *2*, die is afgesloten door de parametrische versterker *Amp*, die zich in een vat vloeibare stikstof bevindt. Wanneer het door de versterker afgegeven signaal weer bij poort *2* komt, wordt het naar poort *3* doorgegeven. Poort *4* is afgesloten met een aangepaste belasting, die zich op kamertemperatuur bevindt. De secties *T* zijn kopse overgangen van een golfpijp naar een coaxiale leiding.

Tabel I. Bijdragen van de verschillende onderdelen aan de ruistemperatuur van het versterkersysteem bij een versterking van 23 dB.

Onderdeel	Fysische temp. (K)	Demping (dB)	Ruisbijdrage (K)
Ingangsgolfpijp	320	0,02	2,25
Circulator (ingang)	320	0,15	11,8
Neerw. verbinding	80	0,05	1,34
Overgang	80	0,10	2,3
Versterker	80	—	13
Overgang	80	0,10	0,004
Opgaande verbinding	80	0,05	0,002
Circulator (uitgang)	320	0,30	0,09
Overgang	320	0,1	0,03
Coaxiale uitgangslijn	320	0,3	0,09
Totale ruistemperatuur			31 K

[13] J. C. Dix, Design of waveguide/coaxial transition for the band 2.5-4.1 Gc/s, Proc. IEE **110**, 253-255, 1963.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

De versterker A en de signaal- en pompgolfpijpen hangen aan een bovenplaat Q en zijn ondergebracht in een afgesloten vat K van zorgvuldig thermisch ontwerp, dat gevuld is met heliumgas. Het vat beschut de microgolfonderdelen tegen waterdamp en vloeibare stikstof, die verliezen zouden veroorzaken en, bij verandering van het stikstofniveau, ook de werking zouden beïnvloeden.

Naar buiten toe moeten de thermische verliezen van het vat te verwaarlozen zijn, maar het moet een goed thermisch contact tot stand brengen tussen de versterker en de vloeibare stikstof. Om de thermische verliezen zo klein mogelijk te houden, is het bovenste deel van het vat van met glasvezel gewapende kunsthars gemaakt, terwijl een goed thermisch contact tussen versterker en vloeibare stikstof is verkregen door het onderste deel C van het vat van koper te maken. De kunstharspijp en het koperen deel zijn verbonden door een paar flenzen F van roestvrij staal, waarvan de ene aan het koperen deel is gesoldeerd en de andere aan het kunstharsdeel gelast. Tussen de met bouten opeengetrokken flenzen ligt als vacuümdichting een gouden O-ring. Herhaalde temperatuurwisselingen tussen 77 K en 300 K hebben geen invloed op de afdichting. Tussen de versterker en de koperen

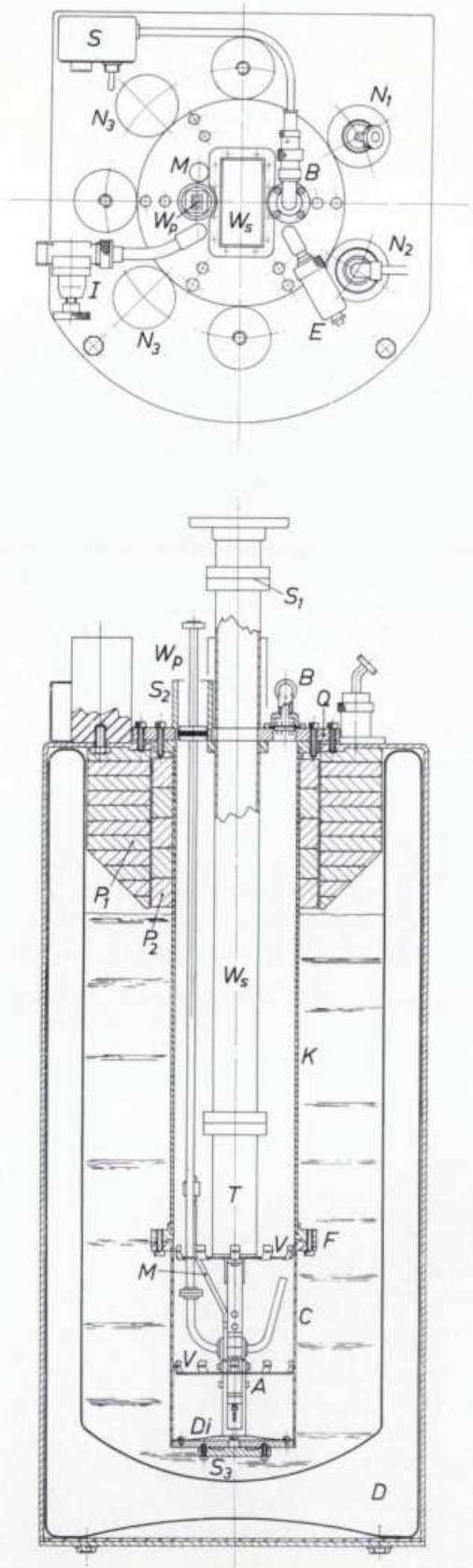


Fig. 7. Doorsnede en bovenaanzicht van de kryogene apparatuur. Buitendiameter 31,8 cm, diameter van het binnenvat 10,2 cm, lengte 58,4 cm. D is een standaard-Dewar-vat (34 liter) voor vloeibare stikstof, gemaakt van roestvrij staal. De versterker A bevindt zich in gasvormig helium binnen het gesloten vat K, waarvan het bovenstuk uit met glasvezel gewapende kunststof is gemaakt om het stikstofverlies door koken te beperken. De onderste helft C is van koper, en met het bovenstuk verbonden door stalen flenzen F, waartussen zich een gouden O-ring-afdichting bevindt. T overgang van de golfpijp naar de coaxiale lijn. W_s signaalgolfpijp, waarvan de wanden uit heel dunne, verkoperde roestvrije staalplaat zijn gemaakt. S_1 over de signaalgolfpijp aangebrachte vacuümafdichting van dunne kunststofplaat. De pompgolfpijp W_p is van verzilverd nikkel en heeft een beweeglijke vacuümafdichting S_2 die verschillen in contractie opvangt. M is een op afstand instelbare eenheid voor de aanpassing van het pompvermogen aan de diodes. Om het verlies door koken te beperken, zijn de stoppen P_1 en P_2 van geëxpandeerd PVC onder de bovenplaat Q geplaatst; de horizontale lijnen stellen ringvormige stralingsvinnen voor. De thermische verbinding tussen de vloeibare stikstof en de versterker wordt gevormd door het koperen onderstuk C, de koperen voelers V en het verend diafragma D, dat verschillen in contractie opvangt. Verder neemt het heliumgas aan de warmteoverdracht deel. De afdichting S_3 tussen stikstof en vacuüm aan de grondplaat is losmaakbaar en zelfvergrendelend, zodat de versterker uit het binnenvat kan worden genomen.

Boven op het binnenste vat: W_p de pompgolfpijp, W_s de signaalgolfpijp, M de besturing van de pompaanpassing, E de helium-veiligheidsklep, B de toevoer van de diode-voorspanning en I de helium-toevoerkraan. Bij het vullen wordt het binnenvat eerst via I geëvacueerd, dan met heliumgas gespoeld en opnieuw geëvacueerd. Ten slotte wordt het gevuld met helium bij een druk van ongeveer 1,1 atm. Terwijl de heliumtoevoer nog op I blijft aangesloten, wordt het Dewar-vat dan via N_1 met vloeibare stikstof gevuld. Is de vulling voltooid, dan wordt I gesloten en de heliumtoevoer afgekoppeld. N_2 is een sonde voor het niveau van de vloeibare stikstof; deze kan worden gebruikt bij een systeem voor automatische bijvulling. Gasvormige stikstof kan ontwijken via de ontluchtingsopeningen N_3, waarvan de kleppen verwarmd zijn. Met schakelaar S kan een, normaal kortgesloten, meter in de varactordiodekring worden opgenomen.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

wand wordt een goed thermisch contact verkregen met behulp van koperen voelers V en een verend diafragma D, dat verschillen in uitzetting mogelijk maakt. Verder zorgt ook het helium in het vat voor de warmteoverdracht.

Fig. 8 is een aanzicht van de „kopse" overgang en van de complete versterker.

De golfpijp W_p voor de toevoer van het pompsignaal (binnenafmetingen 3,56 × 7,12 mm) is langs elektrolytische weg van nikkel gemaakt en van binnen tot een dikte van 5 μm verkoperd om een goede elektrische geleiding te verkrijgen. De signaalgolfpijp is groter (3,404 × 7,214 cm binnenwerks) en kon niet volgens dit procédé worden gemaakt, daar de thermische geleiding dan te groot zou worden. Deze golfpijp is samengesteld uit twee helften van roestvrij stalen plaat, die aan elkaar zijn gelast. Ook deze golfpijp is inwendig tot een dikte van 5 μm verkoperd. Langs een der brede wanden bevindt zich een rij van zes gaten die moeten verhinderen dat de golfpijp wordt ingedrukt als bij het vullen het vacuüm wordt weggenomen (zie bijschrift bij fig. 7). *Fig. 9* is een foto van het gesloten vat en de versterker.

Het gesloten vat hangt in vloeibare stikstof die zich in een roestvrij stalen Dewar-vat van standaardafmetingen bevindt. Om het verlies door koken te verminderen, is de onderkant van de bovenplaat van het Dewar-vat bedekt met een 15 cm dikke laag van geëxpandeerd polyvinylchloride (PVC). In de bovenplaat zijn verwarmde ontluchtingsgaten aangebracht, om te voorkomen dat de druk gevaarlijk stijgt. Voor het heliumgas in het gesloten vat is ook een veiligheidsklep aangebracht (ongeveer 0,7 kg/cm²).

Bij het ontwerp van de kryogene apparatuur is er in het bijzonder op toegezien dat verschillen in contractie van de verschillende onderdelen mogelijk zouden zijn zonder dat het geheel aan stijfheid zou inboeten en daardoor onbetrouwbaar zou werken. Verder is er bij het ontwerp op gelet, het aantal in vloeibare stikstof ondergedompelde losmaakbare afdichtingen zo klein mogelijk te houden.

Wanneer het Dewar-vat in verticale stand wordt gehouden, is één vulling met vloeibare stikstof voldoende om het systeem 100 uur voldoende gekoeld te houden. Het gehele versterkersysteem is echter vast verbonden met de antenne, waarvan de stand 45° van de verticaal kan afwijken. Onder deze omstandigheden kan één vulling met vloeibare stikstof 72 uur lang voor voldoende koeling zorgen.

Er is ook een voorziening voor het automatisch bijvullen van stikstof aangebracht, die kan worden gebruikt als de installatie lange tijd achtereen zonder onderbreking moet werken. Het vergemakkelijkt ook het werken met de versterkerinstallatie in het hoofdbrandpunt van de antenne.

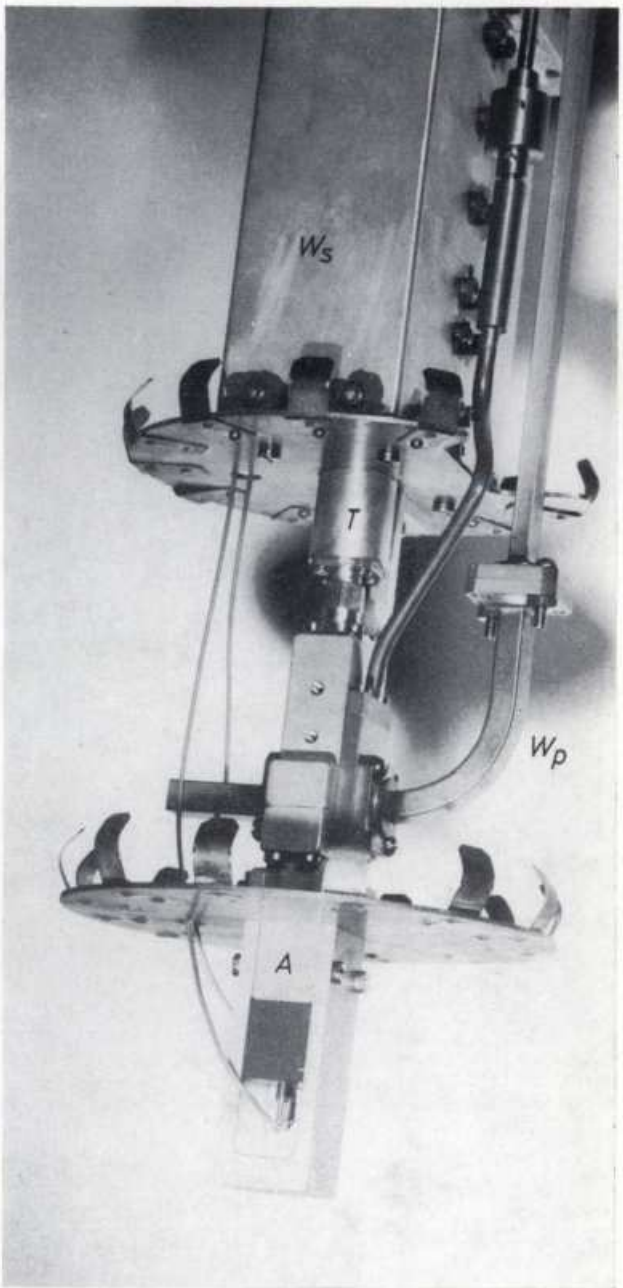


Fig. 8. Foto van het ondereind van de signaalgolfpijp W_s, met daaraan de kopse overgang T en de parametrische versterker A. W_p is de pompgolfpijp.

De ruimte van constante temperatuur

De temperatuur van de varactorkringen wordt door de vloeibare stikstof op ongeveer 80 K constant gehouden, maar om de voor interferometrie noodzakelijke stabiliteit te waarborgen moeten ook de temperaturen van het pompklystron en van de circulator constant worden gehouden. Deze onderdelen zijn daarom ondergebracht in een ruimte van constante temperatuur, die boven op het Dewar-vat is gemonteerd.

Fig. 10 is een foto ervan. Daar het klystron ongeveer 60 watt aan warmte afgeeft, was de beste oplossing de

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

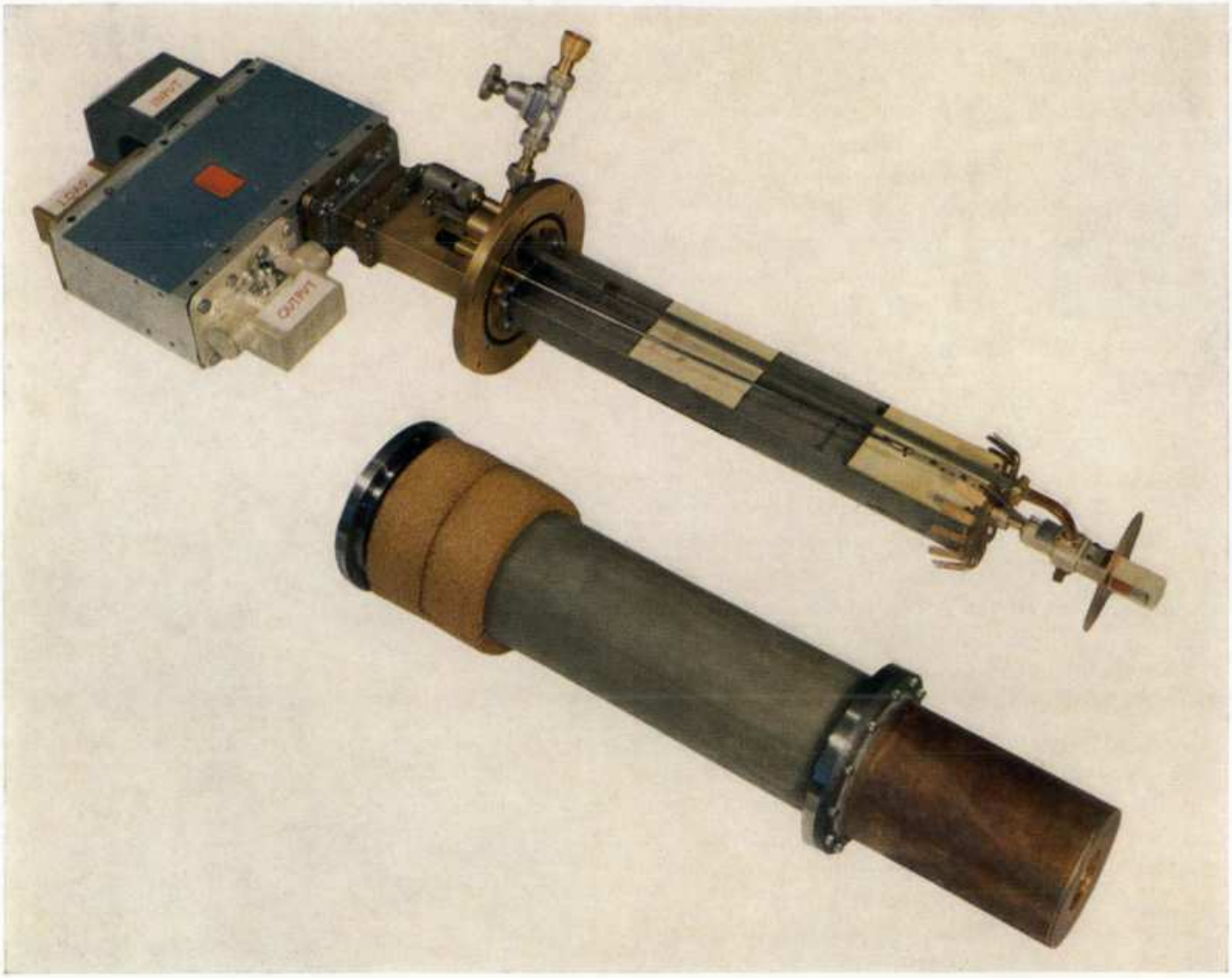


Fig. 9. Op de voorgrond het binnenvat van de kryogene apparatuur, deels van kunststof, deels van koper. Om het boveneinde ziet men de ringen van PVC (P_2 in fig. 7). Achter het vat de apparaten die zich erin en erboven bevinden (vgl. fig. 7).

temperatuur te stabiliseren op een waarde die boven de hoogste van de omgeving ligt. Dit is bereikt door het gebruik van ventilatoren met verwarmingselementen die automatisch worden geregeld door kwikcontact-thermometers.

Het buitenoppervlak van de ruimte van constante temperatuur, waardoor de warmte naar buiten treedt, is gelakt met witte verf die een emissiefactor van ongeveer 0,8 heeft. De afmetingen zijn $50 \times 37{,}5 \times 25$ cm. Een afdekking tegen het weer, met dezelfde verf gelakt, is ook aanwezig; hierdoor kan het geheel, gevormd door de ruimte van constante temperatuur en het Dewar-vat, ook in de open lucht worden gebruikt.

Eigenschappen

De voornaamste eigenschappen van het versterkersysteem zijn weergegeven in *tabel II*.

De ruistemperatuur is gemeten volgens de *Y*-factor-methode, die ook gebruikt is bij de masers [3] waarvoor de parametrische versterkers in de plaats komen. Bij deze methode worden, afwisselend bij kamertemperatuur en bij 77 K, aangepaste belastingen met de ingang verbonden en wordt het verschil in uitgangsruis be-

Tabel II. De voornaamste eigenschappen van de parametrische versterkers voor de radioastronomische interferometer te Defford (Engeland).

Centrale signaalfrequentie	2,695 GHz (11,12 cm)
Versterking	23 dB
Effectieve ruistemperatuur aan de ingang	31 ± 3 K
Bandbreedte (3 dB)	40 MHz
Spanningsreflectiecoëfficiënt aan de ingang	0,13
Stabiliteit van de versterking	0,25 dB per uur 0,5 dB per dag
Fasestabiliteit	2° per dag
Pompfrequentie	29,5 GHz
Pompenergie	150 mW
Werktemperatuur	77 K
Ononderbroken werkingstijd (verticaal)	100 uur
Ononderbroken werkingstijd (bij 45° hellen)	72 uur

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

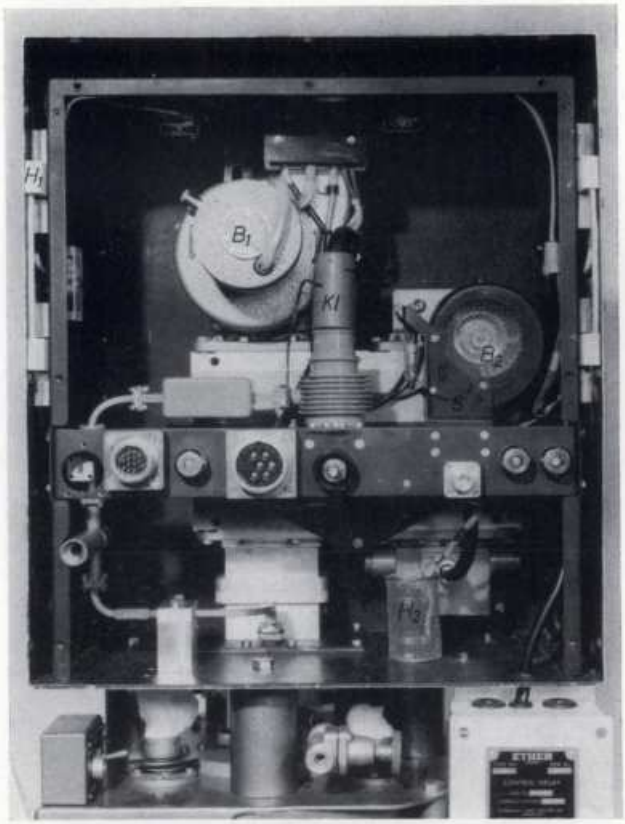


Fig. 10. De ruimte van constante temperatuur. De hoofdventilator B_1 zuigt lucht langs de onderdelen, die dan langs de verwarmingselementen H_1 wordt geblazen die zich tussen de wanden van de kast bevinden. De ventilator B_2 koelt het klystron *K1*; de sensor *S*, een kwikcontactthermometer, bevindt zich tussen B_2 en het klystron. De verwarmingselementen H_2 worden ingeschakeld om condensatie te voorkomen als de versterker in rust bijstaat.

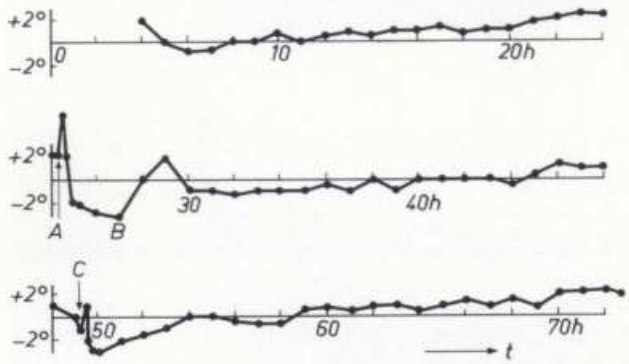


Fig. 11. Fasestabiliteit van het parametrische versterkersysteem over een ononderbroken werkingsperiode van drie dagen. Bij *A* werd de stikstofhoeveelheid aangevuld door bijschenken, bij *B* was er een storing in het meetsysteem en bij *C* werd overgegaan op automatische bijvulling met stikstof. Gerekend over een dag verloopt de fase in beide richtingen niet meer dan ca. 2°.

paald. In het praktische gebruik echter hangen de ruiskwaliteiten van het systeem van de antenne-aanpassing af: de vierde poort van de circulator is afgesloten met een belasting die zich op kamertemperatuur bevindt, en elke onvolkomenheid van de ingangsaanpassing zal er de oorzaak van zijn dat er door reflectie ruis in het systeem terugkomt.

De fasestabiliteit is met een fasemeetbrug gemeten; de resultaten ziet men in *fig. 11*. Deze metingen zijn uitgevoerd in een groot gebied van omgevingstemperaturen; hieruit kan een temperatuurstabiliteit van minder dan 2° per dag worden afgeleid [14].

De schrijvers betuigen hun dank aan het Britse Ministry of Defence (Navy Department) voor zijn toestemming tot de publikatie van dit artikel, dat betrekking heeft op werk dat is uitgevoerd onder CVD-(Coordination of Valve Development) -contract.

Aanhangsel: Verklaring van het verschijnsel van parametrische versterking

De verklaring van het verschijnsel van parametrische versterking die enige jaren geleden in dit tijdschrift is gegeven [13] gold voor een tamelijk eenvoudig geval. Wij zullen thans deze verklaring een weinig verder uitwerken op een door H. Mooijweer [16] aangegeven wijze.

Wij beschouwen een eenvoudige verliesvrije *LC*-kring (*fig. 12*) waarin een stroom rondloopt van frequentie $f = 1/2\pi\sqrt{LC}$. De lading, en bijgevolg ook de spanning, van de capaciteit verlopen dan sinusvormig met de tijd. De capacitantie is nu het reactieve element dat gevarieerd wordt, en wij veronderstellen dat deze variatie plaatsvindt op de wijze die in fig. 12 is weergegeven en die verkregen wordt door beweging van de platen van de condensator. Iedere keer dat de lading een maximum bereikt worden de platen met een ruk uit elkaar getrokken, en zij worden weer naar elkaar toe gebracht wanneer de lading door nul gaat. Bij de eerste beweging moet energie worden toegevoerd, bij de tweede geen. Over een gehele trillingsperiode gerekend is er dus toevoer van energie aan de kring, en deze helpt de trilling onderhouden. Dientengevolge stijgt de amplitude van de spanning over de capaciteit stapsgewijs, want door de aanwezigheid van de zelfinductie heeft de lading de neiging om constant te blijven bij verandering van de capaciteit. Het effect kan als een soort „negatieve demping" worden aangeduid. Trillingen van geringe amplitude die als gevolg van een lichte stoornis in de kring kunnen ontstaan, slingeren dan op als gevolg van de periodieke variatie van de capaciteit (de pompwerking) bij een frequentie die tweemaal de resonantiefrequentie van de kring is. Dit houdt in dat een klein signaal van de resonantiefrequentie dat in de kring wordt geïnjecteerd, óók toeneemt, d.w.z.: versterkt wordt. Voor een kring met verliezen geldt over het geheel hetzelfde; er wordt dan slechts een deel van de door pompen toegevoerde energie door de verliezen in warmte omgezet.

Wanneer de fase φ van het pompsignaal ten opzichte van de in fig. 12 geschetste toestand ($\varphi = 0$) wordt veranderd, neemt de energieoverdracht af [9] en deze kan, als φ tussen 45° en 135° ligt, zelfs negatief worden. Wanneer nu de frequentie van het ingangssignaal een weinig van de halve pompfrequentie verschilt, heeft dit hetzelfde effect als een geleidelijke verandering van de fase, en er ontstaat dan een amplitudemodulatie van het versterkte signaal.

[14] De gegevens over de fasestabiliteit zijn beschikbaar gesteld door Mr. G. Moule van het Royal Radar Establishment te Malvern, Engeland.

[15] B. Bollée en G. de Vries, Experimenten op het gebied van parametrische versterking, Philips techn. T. **21**, 172-176, 1959.

[16] H. Mooijweer, Parametrische versterkers; een inleiding, Ned. T. Natuurk. **30**, 145-158, 1964.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Voor vele toepassingen is het nodig een vrij brede band van frequenties te versterken, en er zou dan een amplitudemodulatie van dit type ontstaan.

Deze moeilijkheid kan worden omzeild door toepassing van een iets ingewikkelder schakeling. In plaats van een enkelvoudige trillingskring met periodiek veranderende capaciteit of zelfinductie, wordt een schakeling gebruikt die twee (of meer) resonantiefrequenties heeft bij koppeling door de periodiek veranderende reactantie. Men vindt dan dat voor een dergelijke configuratie de hierboven beschreven fasevoorwaarde niet langer geldt. Wij zullen dit aan de hand van *fig. 13* verklaren. Wij veronderstellen weer dat de kring verliesvrij is en dat C het element is dat gevarieerd wordt. Wij veronderstellen verder dat één lus uitsluitend negatief, daar de capaciteit alleen vergroot wordt bij de nuldoorgangen van de ladingskromme.

Ook hier is het mogelijk dat er spontaan trillingen ontstaan en opslingeren als gevolg van de periodieke variatie van een reactief element in de schakeling. Men zou echter denken dat hier dezelfde fasevoorwaarde zou gelden als in de vorige situatie, maar in werkelijkheid is dit niet het geval: in de praktijk wordt aan de versterker slechts de wisselstroom van frequentie f_1 toegevoerd (dit is het signaal), en ontstaat de wisselstroom van frequentie f_2 slechts door de inwerking van het pompsignaal op het binnenkomende signaal als mengsignaal over de veranderende reactantie. Deze bij de frequentie f_2 opgewekte wisselstroom heeft dan altijd automatisch de juiste fase. Bij een verkeerde fase zou deze

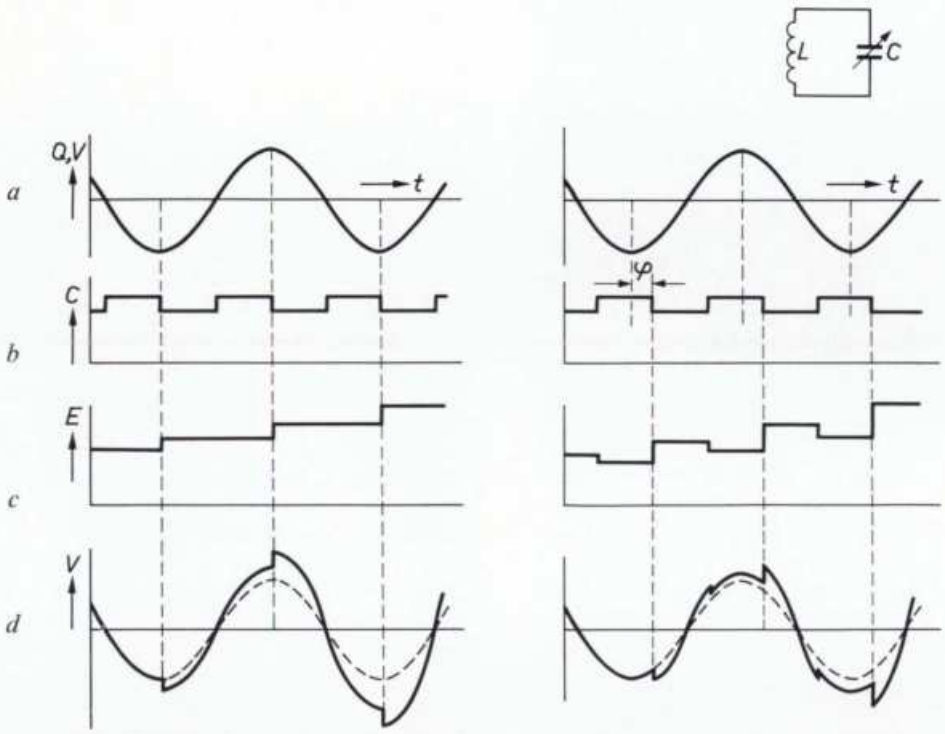


Fig. 12. Parametrisch aanstoten van een eenvoudige LC-kring. De capaciteit C is de reactantie die gevarieerd wordt; er is aangenomen dat deze variatie tot stand wordt gebracht door de platen van elkaar af en naar elkaar toe te bewegen. *a*) Oorspronkelijk verloop van de spanning V en de lading Q van de condensator C met de tijd t. *b*) Periodieke variatie van C. *c*) Toeneming van de energie E in de kring als gevolg van de pompwerking. *d*) Toeneming van de spanning V over de condensator („negatieve demping"). Bij het links geschetste geval zijn de variaties van C in fase met het te versterken signaal; rechts is er een faseverschil φ.

trillingen van frequentie f_1 onderhoudt en de andere trillingen van frequentie f_2. De totale lading op de capaciteit heeft dan twee componenten: $q_1 = q_0 \sin \omega_1 t$ en $q_2 = q_0 \sin \omega_2 t$, waarin ω_1 en ω_2 de met f_1 en f_2 overeenkomende hoekfrequenties zijn. Wij hebben voor het gemak aangenomen dat de amplitudes van de twee componenten dezelfde zijn, maar dit is niet essentieel. De totale lading q is dan $q_1 + q_2$, of wel $2q_0 \sin \frac{1}{2}(\omega_1 + \omega_2)t \cos \frac{1}{2}(\omega_1 - \omega_2)t$, hetgeen een trilling van frequentie $\frac{1}{2}(\omega_1 + \omega_2)$ voorstelt die in amplitude wordt gemoduleerd bij een frequentie $\frac{1}{2}(\omega_1 - \omega_2)$. (De draaggolf wordt onderdrukt.)

De pompgenerator doet de capaciteit weer volgens een blokjeskromme veranderen. Bij de nuldoorgangen van $\sin \frac{1}{2}(\omega_1 + \omega_2)$ wordt de capaciteit vergroot en op de midden daartussen gelegen punten weer verkleind. Dit betekent dat de pompfrequentie nu gelijk is aan $f_p = f_1 + f_2$. De energie die de pompgenerator elke keer dat de capaciteit wordt verkleind aan de capaciteit levert, is bovendien nu niet langer dezelfde, aangezien de lading zelf in amplitude wordt gemoduleerd. Deze energie is echter nooit stroom in ieder geval snel gedempt worden, daar deze energie dan uit de kring wordt weggepompt. Het mengprodukt, de lading of de stroom die met de frequentie $f_p - f_1 = f_2$ varieert, is het meeloopsignaal.

In deze schakeling, waarvoor de fasevoorwaarde niet langer relevant is, kunnen de frequenties f_1 en f_2 ver genoeg uiteen liggen om door filters te kunnen worden gescheiden.

De schakeling met de twee afgestemde kringen kan als van algemeen karakter worden gezien; de schakeling met één afgestemde kring en $f_1 = f_2 = \frac{1}{2}f_p$ wordt daarom aangeduid als het „degeneratieve" geval.

In een gewone LC-kring die behept is met verlies (voorgesteld door een serieweerstand R), zal bij een verstoring een gedempte trilling ontstaan van de vorm $\exp(-R/2L)t \cos(\omega t + \varphi)$. In de gepompte kringen die we hier beschouwen, slingert de trilling echter op door de pompwerking (totdat deze uiteindelijk door niet-lineariteit wordt begrensd). Wanneer we nu aannemen dat de trillingsamplitude exponentieel toeneemt, zou de exponentiële

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

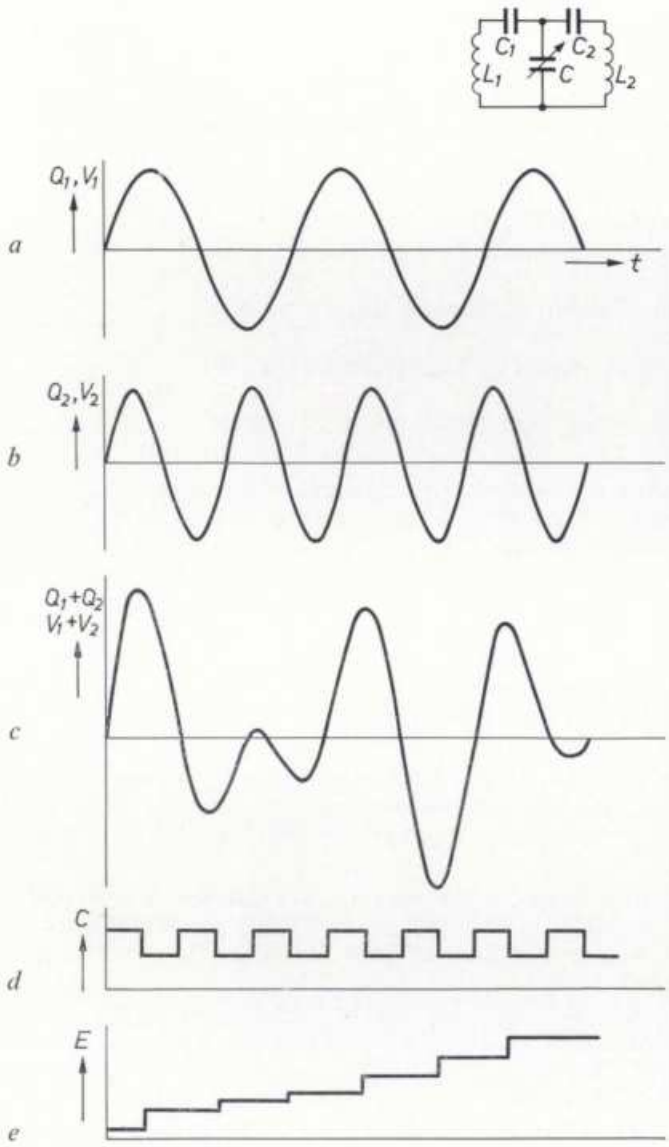


Fig. 13. Parametrische excitatie van een kring met twee resonantiefrequenties. *a*) De component Q_1 van de lading die met de frequentie f_1 varieert. *b*) De component Q_2 van de lading die met de frequentie f_2 varieert. *c*) De totale lading $Q_1 + Q_2$ op de condensator C. *d*) Periodieke variatie van C. *e*) Toeneming van de energie in de kring als gevolg van de pompwerking.

coëfficiënt positief moeten zijn — en dit veronderstelt de aanwezigheid van een effectief *negatieve weerstand*. Bij analytische behandeling is het vaak voordelig de versterking te beschouwen als te zijn ontstaan door het opnemen van een negatieve weerstand in de kring.

In de hierboven gegeven beschrijving is de pompwerking beschouwd als te zijn verkregen door het langs mechanische weg variëren van de capaciteit volgens een blokjeskromme. In werkelijkheid wordt de verandering van de capaciteit met de tijd natuurlijk verkregen door aan de varactordiode een hoge sinusspanning te leggen.

Samenvatting. In de Mullard Research Laboratories is een parametrisch versterkersysteem ontwikkeld voor de astronomische radio-interferometer te Defford in Engeland. Twee van deze systemen vervangen de tot nu toe gebruikte twee masers. Voor de radioastronomie moet het ontvangsysteem bijzonder stabiel en gevoelig zijn, en aan deze eisen kan worden voldaan wanneer als eerste ontvangertrap een parametrische versterker met varactordiode wordt gebruikt die met vloeibare stikstof wordt gekoeld. Een kort overzicht van de beginselen waarop parametrische versterkers berusten, wordt gevolgd door een verslag van de bij het ontwerp van een versterker met twee diodes gevolgde beginselen en een beschrijving van het volledige systeem. Er wordt bijzondere aandacht gewijd aan de invloed van verliezen en andere onvolkomenheden langs de weg die het signaal doorloopt, en de toeneming van de ruis die daarvan het gevolg is wordt bepaald. De stabiliteit wordt verkregen door zorgvuldige stabilisatie van de temperatuur der niet-gekoelde microgolfonderdelen. De versterkers werken bij 2,695 GHz en worden bij 29,5 GHz gepompt. De ruistemperatuur is 31 ± 3 K en bij de maximale versterking (23 dB) is de 3-dB-bandbreedte 40 MHz. De stabiliteit van de versterking is 0,25 dB over één uur en 0,5 dB over 24 uur, terwijl de fasestabiliteit 2° over 24 uur is. Het systeem kan 100 uur werken op één vulling met stikstof, terwijl ook automatische bijvulling mogelijk is.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Recente wetenschappelijke publikaties

Deze publikaties zijn afkomstig van medewerkers van laboratoria en fabrieken, behorende tot of samenwerkende met ondernemingen van het Philipsconcern, in het bijzonder van medewerkers van de navolgende research-laboratoria:

Philips' Natuurkundig Laboratorium, Eindhoven *E*
Mullard Research Laboratories, Redhill (Surrey), Engeland *M*
Laboratoires d'Electronique et de Physique Appliquée, Limeil-Brévannes (Val-de-Marne), Frankrijk *L*
Philips Forschungslaboratorium Aachen GmbH, Weißhausstraße, 51 Aachen, Duitsland *A*
Philips Forschungslaboratorium Hamburg GmbH, Vogt-Kölln-Straße 30, 2000 Hamburg 54, Duitsland *H*
MBLE Laboratoire de Recherches, 2 avenue Van Becelaere, 1170 Brussel (Boitsfort), België *B*

Van de meeste dezer publikaties zullen binnenkort overdrukken beschikbaar zijn. Men kan deze aanvragen bij het betrokken laboratorium (zie de codeletter) of bij de Administratie van Philips' Natuurkundig Laboratorium, Eindhoven.

R. P. Adriaanse & P. van der Laan (Philips Information Systems and Automation Division, Eindhoven): Some remarks on a general class of Markov processes with discrete time parameter and dependent increments.
Technometrics **12**, 851-866, 1970 (No. 4).

C. S. Aitchison & R. Davies: Large-signal varactor measurements.
Electronics Letters **6**, 780-781, 1970 (No. 24). *M*

G. Arlt, W. Puschert & P. Quadflieg: Dielectric behaviour of lithium iodate.
Phys. Stat. sol. (a) **3**, K 243-246, 1970 (No. 4). *A*

G. Blasse & A. D. M. de Pauw: Crystal structure of some $LiMe^{5+}Me^{6+}O_6$ compounds.
J. inorg. nucl. Chem. **32**, 3960-3961, 1970 (No. 12). *E*

J. Bloem (Philips Semiconductor Development Laboratory, Nijmegen): Silicon epitaxy from mixtures of SiH_4 and HCl.
J. Electrochem. Soc. **117**, 1397-1401, 1970 (No. 11).

D. Blom & J. O. Voorman: Noise and dissipation of electronic gyrators.
Philips Res. Repts. **26**, 103-113, 1971 (No. 2). *E*

P. A. Boter, M. D. Wijnen & H. L. C. Nuyens (Philips Electroplating Laboratories, Eindhoven): Some new refill cell systems.
Power Sources 1968, editor D. H. Collins, Pergamon Press, Oxford 1970, pp. 359-371. *E*

A. Boucher & L. Hollan: Thermodynamic and experimental aspects of gallium arsenide vapor growth.
J. Electrochem. Soc. **117**, 932-936, 1970 (No. 7). *L*

J. Bouma, A. J. J. Franken & J. D. B. Veldkamp: A tensile testing machine for thin filaments of high strength and stiffness.
J. Physics E **3**, 1006-1008, 1970 (No. 12). *E*

J.-P. Boutot & G. Piétri: Ultrahigh-speed microchannel photomultiplier.
IEEE Trans. **ED-17**, 493-495, 1970 (No. 7). *L*

P. C. Brandon: Thiocyanato-indoles as energy-transfer inhibitors in photophosphorylation.
Arch. Biochem. Biophys. **138**, 566-573, 1970 (No. 2). *E*

P. B. Braun, J. Hornstra & J. I. Leenhouts: The crystal structure of tricyclo[4,3,1,$1^{3,8}$]undecane-4,5-dione.
Acta cryst. **B 26**, 1802-1806, 1970 (No. 11). *E*

J. C. Brice: Pulling crystals for optical devices.
Opt. Laser Technol. **2**, 206-208, 1970 (No. 4). *M*

K. H. J. Buschow: The crystal structure of Th_2Co_7.
Acta cryst. **B 26**, 1389-1392, 1970 (No. 10). *E*

K. H. J. Buschow, A. M. van Diepen (Natuurkundig Laboratorium der Universiteit van Amsterdam) **& H. W. de Wijn** (Natuurk. Lab. Univ. Amst.): Magnetic properties and nuclear magnetic resonance of cubic RCu_5 intermetallic compounds.
J. appl. Phys. **41**, 4609-4612, 1970 (No. 11). *E*

K. H. J. Buschow & A. S. van der Goot: The crystal structure of rare-earth nickel compounds of the type R_2Ni_7.
J. less-common Met. **22**, 419-428, 1970 (No. 4). *E*

Ph. Chevalier, J.-P. Boutot & G. Piétri: A PM of new design for high speed physics.
IEEE Trans. **NS-17**, No. 3, 75-78, June 1970. *L*

J. B. Coughlin & R. W. Lindop: Subnanosecond delays in circuit complexes measured by slice probing.
Solid State Technol. **14**, No. 3, pp. 12 & 70, March 1971. *M*

P. Delsarte: Weights of *p*-ary Abelian codes.
Philips Res. Repts. **26**, 145-153, 1971 (No. 2). *B*

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

P. Delsarte, J. M. Goethals & F. J. Mac Williams (Bell Telephone Laboratories, Murray Hill, N.J.): On generalized Reed-Muller codes and their relatives.
Information and Control **16**, 403-442, 1970 (No. 5). *B*

F. Desvignes, V. Duchenois & R. Polaert: Equipement pour la mesure continue du diamètre de fibres.
Techniques Philips 1970, No. 5, 2-10. *L*

F. Dintelmann (II. Physikalisches Institut der Technischen Hochschule Darmstadt), **E. Dormann** (II. Phys. Inst. T. H. Darmstadt) **& K. H. J. Buschow:** NMR-investigation on ferromagnetic, yttrium-diluted $GdAl_2$.
Solid State Comm. **8**, 1911-1913, 1970 (No. 22). *E*

J. A. W. van der Does de Bye, A. T. Vink, A. J. Bosman & R. C. Peters: Kinetics of green and red-orange pair luminescence in GaP.
J. Luminescence **3**, 185-197, 1970 (No. 3). *E*

F. Doittau, H. Bourcier, G. Verschoore, M. Hébert (allen SODERN, Parijs) **& J. C. Pauwels:** Caméras ultra-rapides. Problèmes relatifs au dispositif d'ouverture du tube obturateur (générateur d'impulsions très haute tension).
Techniques Philips 1970, No. 5, 11-22. *L*

H. Duifhuis (Institute for Perception Research, Eindhoven): Audibility of high harmonics in a periodic pulse.
J. Acoust. Soc. Amer. **48**, 888-893, 1970 (No. 4, Part 2).

F. C. Eversteijn: Gas-phase decomposition of silane in a horizontal epitaxial reactor.
Philips Res. Repts. **26**, 134-144, 1971 (No. 2). *E*

R. C. French: Electronic arts of non-communication.
New Scientist **46**, 470-471, 1970 (4 June). *M*

K. L. Fuller: AVOID — short-range high-definition radar.
Wireless World **77**, 110-113, 1971 (No. 1425). *M*

R. Genève: Some complementary observations as conclusion *(to the series of papers on medical thermography in Acta Electronica)*.
Acta Electronica **13**, 179-183 (in French), 185-189 (in English), 1970 (No. 2). *L*

T. G. Gijsbers & W. J. Hoogenboezem (Philips Mechanical Engineering Works, Eindhoven): Een numeriek bestuurde coördinatograaf biedt vele mogelijkheden.
Metaalbewerking **36**, 347-352, 1970 (No. 13). *E*

J. M. Goethals & J. J. Seidel (Technical University of Eindhoven): Strongly regular graphs derived from combinatorial designs.
Canad. J. Math. **22**, 597-614, 1970 (No. 3). *B*

A. Gowthorpe: Economical dual-polarity regulated power supplies.
Electronic Engng. **42**, No. 505, 33-35, March 1970. *M*

H. Haug & K. Weiss: A new derivation of the equations of motion for the complex order parameter of helium II.
Physics Letters **33A**, 263-264, 1970 (No. 4). *E*

E. E. Havinga, H. Damsma & M. H. van Maaren: Oscillatory dependence of superconductive critical temperature on number of valency electrons in Cu_3Au-type alloys.
J. Phys. Chem. Solids **31**, 2653-2662, 1970 (No. 12). *E*

B. Hill: Spatial noise in optical data-storage systems using amplitude Fourier-transform holograms.
J. Opt. Soc. Amer. **61**, 386-398, 1971 (No. 3). *H*

F. N. Hooge & J. L. M. Gaal: Fluctuations with a $1/f$ spectrum in the conductance of ionic solutions and in the voltage of concentration cells.
Philips Res. Repts. **26**, 77-90, 1971 (No. 2). *E*

R. E. Jesse & H. F. J. I. Giller: Cellular growth: the relation between growth velocity and cell size of some alloys of cadmium and zinc.
J. Crystal Growth **7**, 348-352, 1970 (No. 3). *E*

M. A. Karsmakers: Het verbinden van glas aan metaal.
Glastechn. Meded. **8**, 116-125, 1970 (No. 4). *E*

D. Kasperkovitz & J. G. van Santen: Integration density and power dissipation of MOS and bipolar shift registers — A comparison.
Microelectronics and Reliability **9**, 497-501, 1970 (No. 6). *E*

A. Klopfer: Wasserstoffdesorption von Wolfram durch Elektronenstoß.
Vakuum-Technik **19**, 167-170, 1970 (No. 7). *A*

H. Koeman (Philips Research Labs. Amsterdam): A controlled analogue pulse height store.
Nucl. Instr. Meth. **86**, 301-309, 1970 (No. 2).

E. Kraetzig: Investigation of superconducting proximity effects with acoustic surface waves.
Physics Letters **33A**, 343-344, 1970 (No. 6). *H*

P. R. Locher & R. P. van Stapele: Supertransferred hyperfine fields on tetrahedral sites in some chromium sulpho- and selenospinels.
J. Phys. Chem. Solids **31**, 2643-2652, 1970 (No. 12). *E*

J. Loeckx: The parsing for general phrase-structure grammars.
Information and Control **16**, 443-464, 1970 (No. 5). *B*

S. R. Longley: Multioctave tunable 3-port circulator using a y.i.g. sphere.
Electronics Letters **6**, 406-408, 1970 (No. 13). *M*

M. H. van Maaren, H. B. Harland & E. E. Havinga: Critical carrier concentration for superconductivity in mixed metal-semiconductor systems.
Solid State Comm. **8**, 1933-1935, 1970 (No. 22). *E*

R. Memming & H. Tributsch (Physikalisch Chemisches Institut, Technische Hochschule, Munich): Electrochemical investigations on the spectral sensitization of gallium phosphide electrodes.
J. phys. Chem. **75**, 562-570, 1971 (No. 4). *H*

R. Metselaar: Een nieuwe wisselwerking: het fotomagnetisch effect.
Chem. Weekblad **66**, No. 41, 31-34, 9 okt. 1970. *E*

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

M. Monneraye: Le scellement métal céramique. Un renouveau du scellement non métallique.
Techniques Philips 1970, No. 5, 23-35. *L*

B. J. Mulder: Preparation of $BaTiO_3$ and other ceramic powders by coprecipitation of citrates in an alcohol.
Amer. Ceramic Soc. Bull. **49**, 990-993, 1970 (No. 11). *E*

W. J. Oosterkamp: Die Entwicklung der Röntgenröhre.
Röntgenpraxis **23**, 252-260, 1970 (No. 11). *E*

J. A. Pals: On the noise of a transistor with d.c. current crowding.
Philips Res. Repts. **26**, 91-102, 1971 (No. 2). *E*

Ph. Piret: Les codes de convolution utilisés pour la correction d'erreurs en paquets.
Rev. HF **8**, 49-59, 1970 (No. 2). *B*

C. Schiller: Interface analysis by X-ray diffraction topography.
Solid-State Electronics **13**, 1163-1166, 1970 (No. 8). *L*

J. F. Schouten (Institute for Perception Research, Eindhoven): Technologische en maatschappelijke evolutie.
Natuurk. Voordr. Diligentia Nieuwe Reeks No. 48, 51-60, 1970.

J. F. Schouten (Institute for Perception Research, Eindhoven): Tijd voor toonhoogte.
Versl. gew. Verg. Afd. Natuurk. Kon. Ned. Akad. Wetensch. **79**, 150-153, 1970 (No. 9).

E. Schwartz: Obere Grenzen für die Empfindlichkeit der Resonanzfrequenzen von Reaktanzzweipolen.
Nachrichtentechn. Z. **23**, 553-558, 1970 (No. 11). *A*

P. J. Severin: On the infrared thickness measurement of epitaxially grown silicon layers.
Appl. Optics **9**, 2381-2387, 1970 (No. 10). *E*

J. M. Shannon, R. A. Ford & G. A. Gard (A. E. R. E., Harwell, England): Annealing characteristics of highly doped ion implanted phosphorus layers in silicon.
Radiation Effects **6**, 217-221, 1970 (No. 3/4). *M*

J. P. Thiran, Ph. van Bastelaer & C. Wellekens: Description of a filter synthesis and analysis program with a special study of the numerical accuracy.
Rev. MBLE **13**, 39-58, 1970 (No. 2). *B*

D. R. Tilley: Superradiance in arrays of superconducting weak links.
Physics Letters **33A**, 205-206, 1970 (No. 4). *E*

J. Ungelenk: Herstellung dünner epitaktischer Galliumarsenidschichten durch Ionenzerstäubung.
Vakuum-Technik **19**, 231-234, 1970 (No. 9). *A*

J. G. Verhagen, G. den Ouden, A. Liefkens & G. W. Tichelaar: Nitrogen absorption by ferritic weld metal during arc welding.
Metal Constr. Brit. Welding J. **2**, 135-143, 1970 (No. 4). *E*

A. G. van Vijfeijken: Technological forecasting: een bruikbaar instrument voor wetenschapsbeleid?
Ned. T. Natuurk. **37**, 5-11, 1971 (No. 1). *E*

A. T. Vink & R. C. Peters: Absorption and luminescence due to excitons bound to neutral acceptors in GaP.
J. Luminescence **3**, 209-229, 1970 (No. 3). *E*

J. Vlietstra: FOURBAR, een interactief systeem voor het samenstellen van vierstangenmechanismes.
Informatie **12**, 508-516, 1970 (No. 12). *E*

J. O. Voorman & D. Blom: Noise in gyrator-capacitor filters.
Philips Res. Repts. **26**, 114-133, 1971 (No. 2). *E*

K. Weiss: Untersuchungen an kubischem Kupfer(I)-sulfid (Digenit), III. Zum elastischen Entmischungseffekt in Digenit.
Berichte Bunsen-Ges. phys. Chemie **74**, 1257-1261, 1970 (No. 12). *E*

J. P. Woerdman: Formation of a transient free carrier hologram in Si.
Optics Comm. **2**, 212-214, 1970 (No. 5). *E*

H. Zijlstra: Domain-wall processes in $SmCo_5$ powders.
J. appl. Phys. **41**, 4881-4885, 1970 (No. 12). *E*

Inhoud van Philips Telecommunication Review **29**, No. 4, 1971:

H. L. Bakker: Long-term stability of 12 MHz coaxial line equipment 8TR 317 (pp. 145-148).

H. L. Bakker & L. F. Dert: Modulation system, type 8TR 331, for the transmission of television signals over 12 MHz line equipment for coaxial cables (pp. 150-159).

H. L. Bakker & L. F. Dert: Measuring results of simultaneous television and telephony transmission over 12 MHz coaxial cable (pp. 160-164).

S. H. Liem, J. P. de Raaff & R. T. van der Schaaf: Type UV telephone system for automatic trunk and international calls (pp. 165-186).

B. J. Beukelman: The undetected-error probability of codes using two-coordinate parity check and of cyclical codes (pp. 188-204).

Jaargang 32, 1971, no. 2 blz. 29-60 Verschenen 29 september 1971

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!